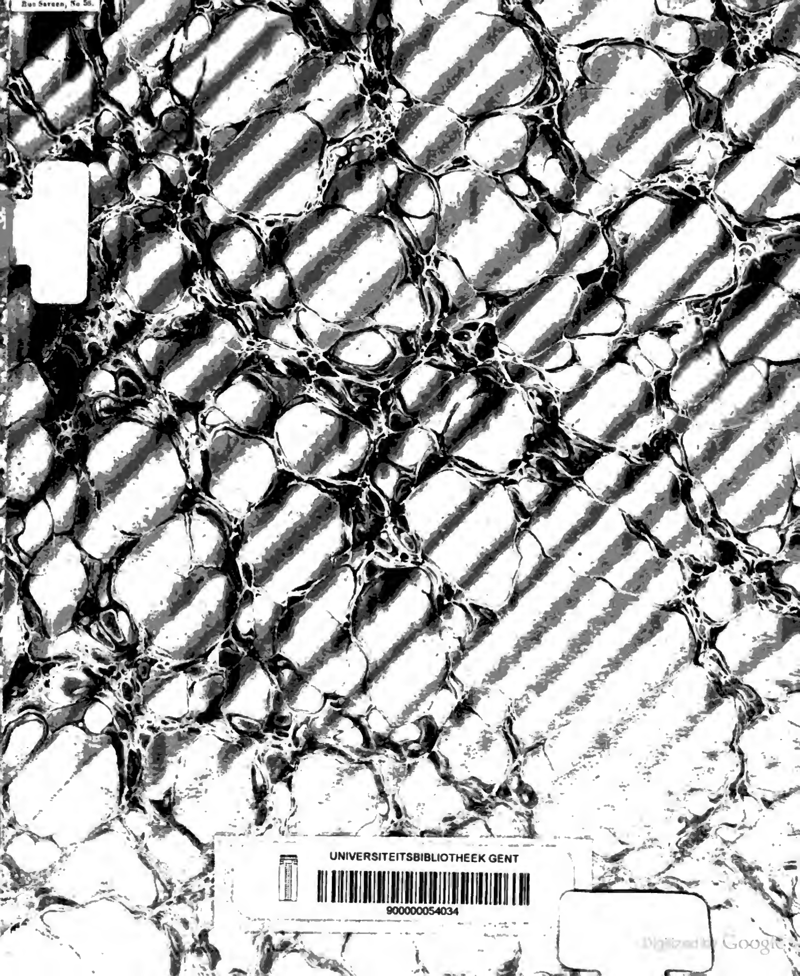



Rue Saveen, No 58.
UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK GENT
900000054034
Digitized by Google



166

TRAITÉ PRATIQUE ET THÉORIQUE

DE LA

COMPOSITION

DES

MORTIERS, CIMENTS

ET

GANGUES A POUZZOLANES

ET DE LEUR EMPLOI DANS TOUTES SORTES DE TRAVAUX,

SUIVI DES

MOYENS D'EN APPRÉCIER LA DURÉE

DANS LES CONSTRUCTIONS A LA MER;

PAR

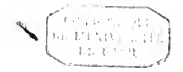
L.-J. VICAT,

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES EN RETRAITE,
CORRESPONDANT DE L'INSTITUT,
MEMBRE HONORAIRE ÉTRANGER DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES ET ARTS DE BOSTON,
COMMANDEUR DE LA LÉGION D'HONNEUR,
CHEVALIER DES ORDRES DE SAINTE-ANNE, DE L'AIGLE ROUGE
ET DES SAINTS MAURICE ET LAZARE.

Tel est le progrès actuel de cette partie de l'art de bâtir, qu'après quelques mois, avec les mortiers à chaux éminemment hydrauliques, et quelques jours, avec certains ciments artificiels, nos maçonneries peuvent égaler en solidité les meilleures maçonneries antiques. (*Pag.* 77.)

GRENOBLE,
IMPRIMERIE MAISONVILLE, RUE DU PALAIS.

1856.



9

PRÉFACE DE L'ÉDITEUR.

Un projet de loi tendant à demander une récompense nationale pour l'inventeur des chaux hydrauliques, des pouzzolanes et des ciments artificiels, fut présenté aux chambres législatives de 1845 par l'honorable M. Dumon, alors ministre des travaux publics; feu M. Legrand, de regrettable mémoire, étant sous-secrétaire d'État au même département. Deux illustres académiciens, MM. le baron Thénard et Arago, furent désignés comme rapporteurs des commissions chargées de l'examen de ce projet (1). Nous avons pensé que l'on nous saurait gré de rappeler ici, en forme d'introduction à ce nouvel ouvrage, comment furent appréciées dans cette mémorable circonstance les premières découvertes de notre habile ingénieur, découvertes qui ont élevé l'art des travaux hydrauliques au degré de perfection où il se trouve aujourd'hui. L'opinion des constructeurs et de nos plus célèbres chimistes, sur l'immensité des services rendus par ces découvertes, a été unanime. Il suffit, pour la justifier, de dire qu'en 1845, moins de vingt ans après leur publication, des relevés authentiques portaient déjà à près de deux cent millions le chiffre des économies réalisées par l'emploi des mor-

---

(1) La commission nommée par la chambre des députés était composée de MM. Arago, le baron de Chabaud-Latour, Félix Réal, le baron Roger du Loiret, Tribert, Baumes, de Golbéry, Dufaure et Salgues.

Celle de la chambre des pairs, de MM. le baron Thénard, Cordier, le baron Dupin, le comte de Gasparin, Gay-Lussac, le vice-amiral Halgan et le baron Sers.

tiers hydrauliques dans les constructions dépendant du service des ponts et chaussées et de la guerre. Si l'on considérait maintenant l'impulsion donnée aux travaux d'art depuis cette époque, il faudrait probablement quintupler ce chiffre qui, dans la suite, ne s'évaluera que par milliards. Voici en quels termes se résumait le célèbre secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences dans le rapport précité :

DES TRAVAUX DE M. VICAT, COMPARÉS A CEUX DES ANCIENS.

« Certains érudits professent une admiration absolue, passionnée, pour les monuments de l'antiquité. A les en croire, les Grecs et les Romains avaient tout découvert dans l'art des constructions; la solidité de certains édifices encore debout montre que les architectes modernes sont de vrais écoliers ; M. Vicat aurait seulement *retrouvé* des méthodes pratiquées jadis en Egypte, à Athènes, à Rome, et dont le souvenir s'était perdu dans les temps de barbarie.

« Quoique nous n'apercevions pas le tort que ces réflexions pourraient faire aux travaux de M. Vicat ; quoique la découverte d'une vérité perdue nous semble devoir être assimilée à la découverte d'une vérité nouvelle, la commission s'est livrée à un examen minutieux de la prétendue supériorité des anciens sur les modernes dans l'art de bâtir. Nous avons cherché surtout si cette supériorité serait soutenable en présence des progrès qui sont dus aux découvertes de notre célèbre ingénieur.

« Des mortiers romains, dit-on, durent depuis dix-huit siècles : un grand nombre de bâtisses modernes sont dans un état déplorable.

« Ce rapprochement pèche par la base. Pour lui donner de la valeur, il faudrait ne mettre en parallèle que les grands monuments des deux époques; mais alors les résultats seraient fort différents de ceux dont les érudits prétendent s'étayer.

« Les remparts de la Bastille étaient d'une extrême solidité, même au milieu de leur épaisseur. On eut recours à la mine pour les détruire ; la poudre devint également nécessaire lorsqu'on voulut, il y a peu

d'années, faire disparaître à Agen les ruines d'un pont construit vers l'an 1200. M. Vicat s'est assuré lui-même que le mortier du pont de Valentré, bâti à Cahors en 1400, surpasse en dureté celui du théâtre antique dont on voit les ruines dans la même ville.

« Les architectes anciens, comme les constructeurs modernes, bâtissaient, suivant la nature des matériaux disponibles, et aussi suivant les exigences financières, soit des édifices inébranlables, soit, avec les mêmes formes extérieures, des temples, des palais et des maisons particulières sans solidité. Les constructions de cette dernière catégorie devaient rapidement disparaître. Les autres ont seules résisté aux ravages du temps, à l'action incessante des intempéries des saisons. Les admirateurs aveugles des siècles passés auraient-ils, par hasard, oublié ces paroles si précises de Pline : « *La cause qui fait tomber à Rome tant de maisons, réside dans la mauvaise qualité du ciment* (1). »

« Si, comme on le prétend, les Romains connaissaient des méthodes certaines pour préparer de bon mortier, on devrait trouver cette matière dans tous leurs monuments publics, avec des qualités à peu près identiques. Or, il s'en faut qu'il en soit ainsi.... On paraît oublier qu'en ce qui touche les connaissances des anciens sur l'art de bâtir, nous n'en sommes pas réduits à de simples conjectures. Vitruve, contemporain et architecte d'Auguste, nous a laissé le tableau détaillé des préceptes en usage parmi les constructeurs de la Grèce et de Rome. Ces préceptes sont loin de justifier l'admiration sans réserve des antiquaires.

« Les anciens n'étaient en possession, cela va sans dire, d'aucune notion exacte concernant la modification chimique qu'une pierre calcaire éprouve par la cuisson; ils ne savaient rien non plus touchant le genre d'action qui restitue aux éléments de cette pierre, passée à l'état de chaux, la dureté et la cohésion dont le feu les avait privés. Les efforts de Vitruve pour enchaîner ces phénomènes dans les liens d'une explication plausible restèrent sans résultat. Il en fut de même jusqu'aux découvertes chimiques de Black sur l'acide carbonique, des tentatives

(1) Ruinarum urbis ea maxime causa quod furto calcis sine ferrumine suo cæmenta componuntur. PLIN., lib. XXXVI. — *Note de l'éditeur.*

des successeurs les plus illustres de Vitruve : des Scamozzy, des Philibert Delorme, des Perrault, etc.

« Un seul mot désabusera tous ceux qui se persuadent que les erreurs théoriques de ces grands architectes étaient sans conséquence. Voyez Philibert Delorme : pour arriver au maximum de solidité des édifices, il croit nécessaire que la chaux ait été extraite du banc même de la pierre calcaire dont le constructeur tirera les matériaux de sa maçonnerie, prescription le plus souvent impossible (1).

« Des constructeurs qui se réglaient dans le choix de leur chaux sur la couleur de la roche d'où on l'extrayait, qui ne connaissaient aucune chaux hydraulique naturelle, qui prodiguaient dans leur mortier l'emploi du tuileau, des briques concassées, ne sauraient, sans une profonde injustice, être placés en parallèle avec les constructeurs modernes. Si nous mettons à part de très-belles observations sur les propriétés des pouzzolanes naturelles, sur la possibilité de faire usage de cette matière pour créer d'énormes blocs factices destinés à être jetés à la mer, les Romains ne nous ont appris rien d'essentiel concernant l'art de bâtir.

« Au reste, tout ce qu'on tenterait pour exalter le mérite des anciens dans l'art des constructions tournerait à la plus grande gloire de M. Vicat. Le meilleur mortier extrait des monuments romains avait, *après deux mille ans d'ancienneté*, une dureté moyennement égale à celle que M. Vicat obtient avec ses bonnes chaux dans le court intervalle d'un an à dix-huit mois. En faisant porter la comparaison sur les résistances moyennes des mortiers antiques, l'avantage reste dans de larges proportions au mortier moderne.

OPINION DES CHIMISTES ET DES CONSTRUCTEURS SUR LES TRAVAUX DE M. VICAT.

« Les découvertes de M. Vicat sont d'une importance palpable. Depuis environ un quart de siècle (ce rapport date de 1845), tous les construc-

(1) Et qui devient absurde quand on bâtit en briques ou en granite. — *Note de l'éditeur.*

teurs en font leur profit ; or, en pareille matière, chacun doit le comprendre, c'est aux praticiens à prononcer définitivement. Néanmoins, pour ne négliger aucun genre d'information, la commission a cru convenable de recueillir aussi les opinions des chimistes, des ingénieurs qui se sont occupés avec le plus de profondeur et d'habileté des applications des sciences aux arts.

« Dans cette recherche, nous n'avons trouvé que des appréciations très-flatteuses des travaux du célèbre ingénieur ; personne ne nous a paru avoir contesté leur nouveauté.

« Le premier Mémoire de M. Vicat sur la production de la chaux hydraulique artificielle est-il présenté à l'Académie des sciences : le corps savant décide, sur la proposition de MM. de Prony, Girard et Gay-Lussac, que le Mémoire paraîtra dans la collection célèbre intitulée : *Recueil des savants étrangers*. A cette approbation, la plus considérable que donnent jamais les commissions académiques, vient se joindre un témoignage d'estime fort recherché dans le monde entier : l'Académie nomme M. Vicat un de ses correspondants.

« Le conseil des ponts et chaussées, appelé, au commencement de l'année 1818, à dire son avis sur la formation artificielle de la chaux hydraulique, déclare, par l'organe de l'austère et très-habile inspecteur général M. Bruyère, « que les avantages des nouveaux procédés seront « innombrables ; qu'ils dispenseront de l'emploi ruineux des véritables « pouzzolanes et de celui des pierres de grandes dimensions, prodiguées « dans les édifices modernes, malgré tant d'exemples contraires offerts « par les Romains et les Goths.... On peut même prévoir, ajoutait « l'habile inspecteur général, que, d'ici à quelques années, il ne sera « plus permis d'employer d'autre mortier dans les constructions « publiques. »

« Lorsque M. Vicat fait paraître la première partie de son travail statistique sur les chaux hydrauliques naturelles de France, l'Académie lui décerne une des médailles fondées par Monthyon.

« Écoutons M. Berthier, un des juges les plus compétents des découvertes de M. Vicat, qu'il eût été possible de trouver dans le monde entier : « Le travail de M. Vicat, sur les chaux et les mortiers, doit être placé

« au rang des plus beaux ouvrages qui soient dus aux membres du corps « des ponts et chaussées. *Sa découverte, relative à la fabrication des* « *chaux hydrauliques artificielles*, est de la plus haute importance.... « En la rendant publique, M. Vicat a agi d'autant plus noblement, qu'il « aurait pu en tirer un parti considérable, soit en la vendant, soit en « s'en réservant l'exploitation par un brevet d'invention. »

« M. Dumas, nous ne voulons citer que de grandes notabilités scientifiques, M. Dumas déclare, dans sa *Chimie appliquée aux arts*, que la solution pratique de la question longtemps débattue des chaux hydrauliques *est due tout entière aux remarquables travaux de M. Vicat.* En parlant des pouzzolanes artificielles, l'illustre chimiste ajoute: « Ce sont pourtant des essais de laboratoire qui ont conduit M. Vicat « à l'*importante découverte* dont il a enrichi les arts. L'état dans lequel « il avait trouvé la question rend cette découverte d'autant plus « remarquable (1). »

---

(1) L'illustre académicien renchérissait encore sur ces éloges dans la séance solennelle de la Société d'encouragement qu'il présidait en février 1846. C'est à propos de la pension modique de 6,000 fr. accordée à M. Vicat, à titre de récompense nationale, qu'il prononça l'énergique allocution suivante, laquelle fut à plusieurs reprises couverte d'applaudissements, et d'autant plus qu'elle exprimait une pensée et un vœu applicables à tous les hommes éminemment utiles:

« C'est peu, Messieurs, ayons le courage de le dire; une grande nation comme la « France devrait traiter les maréchaux de la paix et de la création à l'égal des maré- « chaux de la guerre et de la destruction.

« Quand un homme fait de sa vie entière une campagne persévérante contre la « nature, qu'il lui arrache un à un tous ses secrets, qu'il dote sans réserve son pays « du fruit de ses découvertes; quand celles-ci ont de si vastes conséquences pour le « progrès de la civilisation et le bonheur de l'espèce humaine, cet homme est un « grand conquérant; sans verser des flots de sang, il a gagné de rudes batailles; « un jour, la reconnaissance publique éclairée lui érigera des statues sur nos places « publiques.

« Nous n'attendons pas que de tels hommes, comme il en apparait, hélas! trop « peu dans l'industrie et dans les sciences, aient reçu le sceau de la tombe pour les « mettre à leur place; le Capitole précède pour eux le Panthéon.

« Notre pays n'a pas encore payé toute sa dette envers M. Vicat. Je regrette qu'un « ministre du roi, qui devait présider la séance, ne soit pas là pour entendre mes

« Nous pourrions emprunter des témoignages également flatteurs à une foule d'écrits, et particulièrement à deux beaux articles de M. Chevreul, insérés dans le *Journal des savants*. Ces jugements, malgré les sources élevées d'où ils émanent, ne devaient pas sans doute empêcher la commission de se livrer au travail minutieux dont la chambre a entendu les résultats; mais lorsque, par ses propres lumières, elle a été conduite aux opinions professées à l'Académie des sciences et aux jugements des Gay-Lussac, des Berthier, des Chevreul, des Dumas, des Bruyère, il semblera naturel qu'elle eût désiré se prévaloir d'une circonstance qui prouve qu'elle ne s'est pas égarée.

« En résumé :

« M. Vicat a démontré le premier que les propriétés des chaux *hydrauliques naturelles* dépendent de l'*argile* disséminée dans le tissu de ces chaux, c'est-à-dire d'une action particulière que la silice réunie à l'alumine exerce sur la chaux, quand ces matières ont été amenées par la cuisson à un état convenable.

« M. Vicat a fait le premier de la chaux hydraulique de toutes pièces, non pas seulement en petit dans un laboratoire, mais très en grand sur ses chantiers du pont de Souillac. Une des piles de ce beau pont repose sur une masse de béton formée avec *de la chaux hydraulique artificielle*... M. Vicat a libéralement livré sa découverte au public; il

---

« paroles et pour se pénétrer de l'assentiment qu'elles reçoivent de cette assemblée, « si bon juge de tout ce qui intéresse la dignité du travail.

« Que, du moins, en l'absence regrettée de M. Vicat, retenu par sa santé loin de « nous aujourd'hui, le savant ingénieur (M. Mary, alors ingénieur en chef des ponts « et chaussées), qui vient ici comme ami remplir sa place, veuille bien se faire « auprès de lui l'interprète de l'assemblée.

« La société a cru, en lui décernant le prix qu'elle accorde pour la première fois, « en faire la récompense de ce rare assemblage du génie, de la vigueur morale, « du désintéressement et de la vertu, qui font de M. Vicat un homme des temps « antiques.

« Puissions-nous trouver souvent dans notre heureuse patrie de telles occasions « de remplir les intentions sacrées de M. le marquis d'Argenteuil. (Prix de 12,000 fr. « destiné à récompenser l'auteur de la découverte la plus importante pour l'indus- « trie nationale). » — *Note de l'éditeur.*

est certain qu'en s'assurant, par un brevet d'invention, la fabrication privilégiée de la chaux hydraulique artificielle, cet ingénieur aurait fait une fortune immense.

« La première découverte de M. Vicat, malgré son importance, a pâli, si l'expression nous est permise, à côté des conséquences capitales qu'elle a eues. Nous avons vu cet ingénieur infatigable, parcourant la France pas à pas, recherchant les couches calcaires marneuses, les bancs argileux dans lesquels pouvaient se trouver naturellement réunis en proportions convenables les éléments constitutifs des chaux hydrauliques. Nous l'avons suivi pendant douze années dans cette exploration, devenue tellement fructueuse, que l'on connait maintenant sur le sol français, par les seules indications de M. Vicat, 900 carrières propres à fournir des chaux hydrauliques, tandis qu'auparavant on en comptait tout au plus huit ou dix. M. Vicat a si bien apprécié ce qu'il y aura de glorieux pour lui à avoir mis aux mains des constructeurs tant de riches matériaux enfouis dans les entrailles de la terre ou même délaissés à sa surface, qu'afin de compléter cette œuvre, il a renoncé à l'avancement auquel son ancienneté et son mérite éminent lui donnaient des droits incontestés et incontestables (1).

« Les travaux de M. Vicat, sur les *pouzzolanes*, ont été également clairs et décisifs. Il en est résulté que les argiles les plus pures peuvent donner des pouzzolanes artificielles supérieures ou au moins égales aux pouzzolanes d'Italie; or, comme la nature a déposé l'argile avec une sorte de profusion à la surface du globe, rien n'empêchera aujourd'hui d'obtenir à bon marché des pouzzolanes énergiques en quelque région du pays que l'on se trouve.

« La France, qui, avant M. Vicat, était tributaire de l'Angleterre

(1) M. Vicat, nommé inspecteur divisionnaire (en 1839) sous le ministère de M. Dufaure, a demandé à rester avec son grade d'ingénieur en chef attaché à l'exploration qu'il avait si heureusement commencée. Les ouvrages qu'il a publiés depuis sur les pouzzolanes artificielles et les travaux à la mer prouvent combien cette position subalterne lui paraissait indispensable à leur accomplissement. — *Note de l'éditeur.*

pour le ciment dit romain (1), pourrait aujourd'hui satisfaire à tous les besoins de l'Europe entière.

« Le système général de fondations par voie de bétonnement date des découvertes que nous avons analysées, et particulièrement des beaux travaux du pont de Souillac.... Grâce aux veilles laborieuses et persévérantes de M. Vicat, des travaux réputés jadis impossibles s'exécutent aujourd'hui à coup sûr dans toutes les parties de la France et sans exiger des dépenses ruineuses.... On citerait, en effet, difficilement, une découverte qui, dans le court intervalle de vingt-six années, ait eu de si colossales applications et de si utiles résultats (2). »

A ces citations, extraites textuellement du savant rapport de M. Arago à la chambre des députés de 1845, nous joindrons quelques passages non moins concluants et non moins remarquables de celui de M. le baron Thénard à la chambre des pairs.

« Messieurs, disait l'illustre académicien, toutes les découvertes, toutes les applications utiles trouvent presque toujours leur récompense dans la célébrité qu'acquièrent leurs auteurs, ou dans la fortune dont elles sont la source la plus honorable.

« Mais lorsqu'un homme s'est attaché à résoudre un problème de la plus haute importance, qu'il y a consacré la plus belle partie de sa vie, ses veilles, ses épargnes; lorsqu'il a préféré la gloire d'être utile à celle d'être riche, ne laissant pour héritage à ses enfants qu'un nom respecté et honoré; lorsqu'enfin il a accompli son œuvre et qu'il a doté son pays de découvertes qui doivent l'enrichir en contribuant à sa prospérité et à sa gloire, ce ne sont pas des couronnes académiques qu'il faut décerner à un tel homme, c'est une récompense nationale.

---

(1) Cette dénomination est doublement malheureuse, car les anciens Romains n'ont rien connu de pareil, et elle laisse croire qu'en ce qui concerne ces précieuses substances nous ne sommes que des plagiaires. — *Note de l'éditeur.*

(2) Il est à peu près certain que sans les ressources offertes par les chaux hydrauliques et les ciments, les travaux d'art des chemins de fer, tels que ponts, viaducs, tunnels, auraient demandé des sommes exorbitantes capables de rebuter les compagnies financières, sans compter une énorme perte de temps. — *Note de l'éditeur.*

« Voilà ce qu'a fait M. Vicat ; voilà ce que nous demandons pour lui.

« ...... Le problème à résoudre était de découvrir la cause du durcissement des mortiers, pour parvenir ensuite à en faire d'inaltérables... A cet ingénieur appartient la découverte ; il a révélé les causes ; il a établi les règles ; il a créé l'art....

« Mais, Messieurs (indépendamment des services rendus par les produits artificiels), il en est un autre non moins important et peut-être plus important encore, qui nous reste à vous signaler.

« Il était probable qu'il existait dans les diverses contrées de la France des pierres calcaires capables de donner des chaux hydrauliques dont la qualité serait excellente et le prix inférieur à celui de la chaux artificielle. Il fallait explorer tous les départements ; M. Vicat se mit à l'œuvre et trouva dans presque tous des pierres à chaux de cette nature.

« Son travail est donc complet ; il y a consacré de longues années et l'a terminé en publiant le résumé de ses Mémoires.... Il a dignement couronné son œuvre par cette publication, qui rend ses recherches accessibles à toutes les classes de la société (1).

« Ce n'est pas seulement la France, c'est le monde entier, qui doit

---

(1) Nous extrayons ce qui suit des comptes-rendus de la séance solennelle de l'Académie des sciences, du 28 janvier 1856, à propos du prix de statistique décerné à M. Vicat dans la même séance : « Si les sciences physiques n'habituaient pas les « yeux à de continuels miracles, ne serait-on pas étonné de la révolution que la « publication statistique de M. Vicat a permis d'opérer dans l'art de bâtir ?

« C'est à l'architecture comme application, à la chimie pour les principes, qu'ap- « partient désormais cette collection de faits si ingénieusement découverts et « recueillis par l'auteur.

« En accordant le prix à M. Vicat, votre commission acquitte la dette que lui « avait léguée la commission chargée de l'examen du concours de 1839. Lorsque la « tâche de M. Vicat sera remplie, disait-elle dans son rapport de 1840, il pourra « faire valoir ses droits aux récompenses de l'Académie : nous pensons que ces droits « doivent être réservés.

« L'ouvrage alors ne s'étendait qu'à quarante-deux départements ; il en embrasse « aujourd'hui soixante-seize, et l'on doit le regarder comme terminé, car ce sont « maintenant tous les hommes que M. Vicat a instruits qui complètent journellement « ce catalogue des richesses calcaires de la France. » — *Note de l'éditeur.*

être reconnaissant envers M. Vicat : partout, les gouvernements, les ingénieurs, les constructeurs, ont mis ses procédés à profit, et nous sommes heureux de pouvoir dire que plusieurs souverains étrangers se sont empressés de lui donner des témoignages de leur haute estime en le décorant de leurs ordres; il en était digne : les plus belles décorations brilleraient honorablement sur sa poitrine.

« La commission, Messieurs, en vous proposant à l'unanimité l'adoption du projet de loi, n'a qu'un regret à exprimer, *c'est que pour de si grands services la pension ne soit que de 6,000 fr., et que la moitié seulement soit réversible, en cas de décès du titulaire, sur la tête de ses enfants.*

« Si l'auteur eût été moins généreux, si l'amour du bien public ne l'avait emporté en lui sur l'amour des richesses, il aurait pu acquérir la fortune la plus honorable. Il ne l'a pas voulu, et par cela même il a plus de droits encore à notre reconnaissance, à nos hommages; il en a d'autant plus même, que le titre d'inspecteur divisionnaire lui ayant été offert à la condition voulue par les règlements de ne plus être attaché à son service spécial (et conséquemment de ne plus donner suite à ses travaux de laboratoire), il refusa l'avancement auquel il avait tant de droits, pour pouvoir continuer et achever les belles recherches qui devaient tant contribuer à la prospérité de la France : noble conduite qu'il faut citer, parce qu'elle relève encore dans l'opinion publique l'homme qui la tient, et qu'elle peint d'un seul trait le désintéressement de son caractère.

« Mais, Messieurs, si nous ne croyons pas devoir présenter d'amendement au projet de loi, du moins nous osons faire des vœux pour que M. Vicat soit promu le plus promptement possible au grade le plus élevé de son corps (1), et que ses enfants trouvent appui et protection

(1) C'est en 1845 que ces vœux étaient portés à la tribune de la chambre des pairs; c'est en 1851 qu'un décret réglementaire sur l'âge des retraites dans le corps des ponts et chaussées a surpris M. Vicat dans le grade d'ingénieur en chef, auquel il s'était résigné afin de poursuivre sans distractions de nouvelles recherches sur les moyens d'assurer la durée des travaux à la mer. Il a subi les conséquences de cette mesure sur laquelle, par déférence pour sa volonté, nous devons nous abstenir de toute réflexion. — *Note de l'éditeur.*

auprès du gouvernement dans les diverses carrières qu'ils embrasseront. »

Aux appréciations, aux éloges et aux vœux si énergiquement exprimés par les hommes éminents auxquels nous venons d'emprunter cette introduction, nous n'ajouterons que deux mots : c'est que toutes leurs prévisions sur les immenses services que devaient prochainement rendre les découvertes de M. Vicat se sont réalisées et se réalisent chaque jour, par la facilité et l'économie qu'elles ont apportées et apportent incessamment à l'exécution des travaux d'art de nos chemins de fer et à l'amélioration du service hydraulique de nos rades et de nos ports.

MOTIFS DE CETTE PUBLICATION.

Vingt-sept ans se sont écoulés depuis la publication de nos dernières recherches sur les chaux hydrauliques et les ciments. Dans cet intervalle, l'art de bâtir, en ce qui concerne ces matériaux, s'est enrichi d'une foule d'observations et de faits d'une haute importance : les ciments, par exemple, peu connus en 1828, sont aujourd'hui presque aussi répandus que les chaux hydrauliques ; leur emploi a pris une extension tout à fait inattendue; leur préparation a révélé des influences de cuisson qu'on était loin de soupçonner et qui permettront de tirer un double parti des calcaires à chaux éminemment hydrauliques et d'utiliser les calcaires à chaux limites, en transformant les uns et les autres en ciments d'une grande énergie.

On a pu voir, à l'Exposition universelle des produits de l'industrie, de 1855, de quelles ressources pourront être les ciments, indépendamment de leur application aux grands travaux hydrauliques, pour la statuaire, l'ornementation, et les restaurations monumentales. Le jury chargé de l'examen de ces précieux composés a bien voulu reconnaître la part due à notre initiative dans le progrès et le perfectionnement de leur fabrication, en nous accordant la grande médaille d'honneur, distinction réservée aux inventions d'une utilité exceptionnelle.

Un autre ordre de faits appelait l'attention des ingénieurs et du gou-

vernement: de graves avaries survenues, depuis quelques années, dans certains travaux maritimes, ont démontré l'impuissance, pour leur durée, de la plupart des composés hydrauliques connus, bien qu'employés avec un succès constant en eau douce. Nous avons dû chercher la cause de cette impuissance, en même temps que les moyens d'y suppléer par le choix de matériaux capables de braver l'action des sels de l'eau de mer.

Quelques-unes de ces observations recueillies depuis 1828 ont été insérées dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, mais les plus importantes étaient inédites. Le besoin de les réunir en un seul corps d'ouvrage était urgent. Nous en eussions peut-être, dans l'attente de nouveaux perfectionnements, ajourné encore la publication, si le Conseil général des ponts et chaussées, consulté, ne l'eût jugée opportune.

Son Excellence M. Rouher, Ministre des travaux publics, de l'agriculture et du commerce, s'est empressé, sur cet avis, de nous offrir sa coopération, avec une bienveillance dont nous sommes heureux de pouvoir lui témoigner ici notre reconnaissance.

VICAT.

TRAITÉ PRATIQUE ET THÉORIQUE

DE LA

COMPOSITION

DES MORTIERS, CIMENTS

ET

GANGUES A POUZZOLANES,

ET DE LEUR EMPLOI DANS TOUTES SORTES DE TRAVAUX;

SUIVI DES

MOYENS D'EN APPRÉCIER LA DURÉE

DANS LES CONSTRUCTIONS A LA MER.

I.

1. — La chaux, la silice, l'alumine et la magnésie, sont les principes essentiels dont se composent les gangues qui lient les matériaux employés dans les constructions. L'histoire très-sommaire de ces quatre substances, au point de vue purement chimique, est donc la préface obligée de tout traité sur cette partie de l'art de bâtir.

2. — La chaux est un oxyde métallique de la classe des terres alcalines; elle est blanche, d'une saveur âcre, chaude et caustique; elle se dissout dans environ 1,000 fois son poids d'eau froide, et dans une quantité double d'eau bouillante; quand on l'arrose avec de l'eau, elle l'absorbe avidement et la solidifie en dégageant une chaleur qui élève le thermomètre à 300° centig.;

il en résulte un hydrate qui, dans son état naturel de siccité, ne retient que 0,25 d'eau.

La chaux est une base faible qui se dissout facilement dans les acides; elle contient 100 parties de métal ou calcium et 39,08 d'oxygène; son atôme pèse 350,00 et contient un atôme d'oxygène et un atôme de métal; unie à l'acide carbonique, dans la proportion de 56,40 à 43,60, elle constitue les roches calcaires qui forment une des principales zones de l'écorce du globe.

3. — La silice chimique préparée dans les laboratoires est une substance blanche, farineuse, sans saveur, inattaquable par les acides ordinaires, insoluble dans l'eau, et composée de 100 parties de métal ou silicium et de 108,16 parties d'oxygène; son atôme, composé d'un atôme de métal et de trois atômes d'oxygène, pèse 566,70; la silice des minéralogistes, désignée sous le nom de quartz, ne diffère de la silice chimique que par une plus grande cohésion, due à sa structure cristalline; en cet état, elle résiste à certains agents chimiques dans lesquels la silice proprement dite se dissout et se refuse à certaines combinaisons auxquelles celle-ci obéit très-bien; ainsi la potasse liquide, qui n'attaque pas le quartz, dissout la silice.

4.— L'alumine est, comme la silice, blanche, pulvérulente et excessivement dure à l'état cristallin, mais douce au toucher et peu cohérente lorsqu'on la sépare d'une combinaison et qu'on la dessèche à une basse température; autant alors les acides l'attaquent facilement, autant elle leur est rebelle quand elle est fortement calcinée; elle contient 100 parties de métal ou aluminium et 87,61 parties d'oxygène; son atôme est composé de deux atômes de métal et de trois atômes d'oxygène; il pèse 641,96.

5. — La magnésie se présente sous forme de poudre blanche excessivement légère et très-douce au toucher; elle se combine facilement avec tous les acides et attire puissamment l'acide carbonique; elle est composée de 100 parties de métal ou magnésium et de 63,16 parties d'oxygène; son atôme contient un atôme de métal et un atôme d'oxygène; il pèse 251,30 (*a*).

(*a*) Ces nombres se rapportent au poids de l'atôme d'oxygène représenté par 100; d'où il résulte que les poids des atômes de calcium, de silicium, d'aluminium et de magnésium sont respectivement de 250,00, 266,70, 170,98 et 151,30.

6. — Tels sont les principes élémentaires qui, combinés en proportions diverses, constituent les composés connus dans l'art de bâtir sous les noms de chaux hydrauliques, ciments et pouzzolanes, composés qui concourent à la formation, par voie humide, des gangues qui lient les agrégats appelés mortiers et bétons; dans ces gangues, la silice joue le rôle d'acide et engendre des silicates dont les autres principes, ensemble ou séparément, deviennent les bases.

Nous ne mentionnons ici ni les oxydes de fer ou de manganèse, ni les autres substances qui, la plupart du temps, interviennent accidentellement dans ces silicates, attendu que l'effet de leur présence n'est pas bien connu, et qu'elles sont plus souvent nuisibles que passives.

La chaux, la silice, l'alumine et la magnésie ne se présentent pas isolées et à l'état chimique dans la nature; elles y sont au contraire engagées par voie de combinaison ou de mélange, soit entre elles, soit avec d'autres substances dont il serait trop dispendieux de les extraire pour en disposer individuellement. L'art consiste donc à tirer parti des produits naturels où elles entrent en proportions considérables, pour arriver le plus économiquement possible au but que l'on se propose; ces produits sont, d'une part, les pierres calcaires, pures ou argileuses, ou magnésiennes; et, de l'autre, les argiles, les sables et les substances plutoniques ou neptuniennes, résultant tantôt des déjections volcaniques, tantôt de la décomposition spontanée et séculaire de certaines roches.

II.

DES PIERRES CALCAIRES.

7. — On appelle ainsi toute pierre que la calcination peut transformer en chaux; la pierre calcaire pure, ou chaux carbonatée des minéralogistes, se compose, comme on l'a dit (2), de 56,40 parties de chaux et de 43,60 d'acide

carbonique; c'est la substance la plus répandue dans la nature et la plus variée dans ses formes, son tissu, son aspect et ses associations; elle appartient à toutes les formations du globe; elle fait partie des roches primordiales, des terrains de transition, et compose la plupart des terrains de seconde et de troisième formation; les lithophytes la créent de toutes pièces et en construisent d'immenses récifs; les mollusques s'en enveloppent, et toutes les classes des êtres organisés la produisent ou se l'approprient journellement.

8. — La pierre calcaire se dissout toujours complétement dans les acides faibles lorsqu'elle est pure ou seulement mélangée de carbonate de magnésie; elle laisse, au contraire, un résidu, lorsqu'elle contient de l'argile, ou du sable, ou divers oxydes métalliques. La présence de ces substances étrangères constitue plusieurs espèces que les minéralogistes distinguent en calcaires argileux ou marneux, arénacés, ferrugineux, manganésiens, bitumineux, fétides, etc.; puis, dans chacune de ces espèces, viennent des variétés de forme et de tissu, spécifiées sous les dénominations de compactes, grossières, crayeuses, granulaires, lamellaires, schistoïdes, saccharoïdes, etc. Cette nomenclature a son utilité, mais ce qu'il importe principalement au constructeur de savoir, c'est que chaque espèce produit par la cuisson une chaux particulière, distincte par son poids, sa couleur, son avidité pour l'eau, et surtout par le degré de dureté ou de cohésion qu'elle donne aux composés artificiels connus sous les noms de bétons, de mortiers, etc.

9. — Les calcaires les plus purs se trouvent dans les terrains anciens stratifiés, au milieu des schistes et gneiss cristallins; on les trouve également à tissu saccharoïde et très-purs dans les terrains beaucoup plus modernes, comme ceux de Carrare. Le calcaire des formations dites de transition peut présenter les mêmes caractères minéralogiques; on observe, cependant, que son grain, quoique cristallin, se rapproche du compacte par sa petitesse, et qu'il est même rare d'en trouver sur une grande étendue dont la cassure soit décidément grenue.

Dans les terrains supérieurs, dont la masse principale est calcaire, les géognostes distinguent trois grandes formations, qui se succèdent de bas en haut, savoir : 1° jurassique ou oolitique; 2° crayeuse ou crétacée; 3° tertiaire.

Chacune d'elles se divise en sous-groupes nombreux dont nous n'avons pas à nous occuper ici. C'est dans ces trois grandes divisions de l'écorce du globe que se rencontrent les calcaires les moins purs; l'argile est la substance dont ils sont le plus ordinairement imprégnés; elle s'y trouve en proportions très-variables et souvent accompagnée d'oxydes de fer et de manganèse, de sable ou quartz en particules plus ou moins fines, de fer sulfuré, de substances organiques altérées ou bitumineuses, etc. On y trouve aussi des roches mélangées de carbonate de chaux et de carbonate de magnésie, qui prennent le nom de dolomies quand cette dernière base intervient en grandes proportions.

10. — La couleur et la texture ne peuvent fournir aucun indice certain sur la composition intime des roches calcaires; on remarque, cependant, que l'argile se trouve beaucoup plus fréquemment dans le tissu des pierres tendres ou d'une dureté médiocre, dont la couleur tire sur le gris sale, ou cendré, ou roux, ou bleuâtre, que dans celui des pierres dures d'une couleur claire et à texture compacte ou cristalline.

Le calcaire argileux est d'ailleurs facilement altérable par les intempéries; il se dépouille d'une partie de son carbonate de chaux; la gelée l'émiette et le réduit en poussière que les pluies changent en boue marneuse. Mais toutes ces données sont trop incertaines pour servir à une appréciation quelconque du degré de pureté d'une substance calcaire; la chimie peut seule résoudre ce problème; elle fournit un premier moyen très-simple de dosage : on broie la pierre, on passe la poudre au tamis de soie, on en met deux ou trois grammes dans une fiole ou dans un simple verre à boire, on y verse un peu d'eau pure pour former bouillie claire avec la poudre; puis on y ajoute, goutte à goutte, à diverses reprises, de l'acide azotique ou chlorhydrique pur, étendu, en agitant chaque fois le vase, et cela jusqu'à ce qu'il ne se produise plus d'effervescence; si toute la poudre se dissout, ou s'il ne reste qu'un très-faible dépôt au fond du vase, c'est une preuve que la pierre essayée est pure ou à peu près pure; à moins qu'elle ne contienne du carbonate de magnésie, qui se dissout comme le carbonate de chaux, mais plus lentement et avec une moindre effervescence.

S'il reste au fond du vase un dépôt boueux plus ou moins gris, ou verdâtre, ou roussâtre, c'est de l'argile plus ou moins pure, quelquefois mêlée de sable et de matières organiques décomposées; en séparant ce dépôt de la disso-

lution au moyen d'un filtre en papier sans colle, et le calcinant dans un creuset de Hesse ou de porcelaine, et mieux de platine, après l'avoir lavé sur le filtre même, on obtiendra, par son poids comparé à celui de la poudre attaquée, la mesure exacte de l'impureté du calcaire essayé.

Cette première opération, que chacun peut faire, indiquera approximativement, comme on l'expliquera bientôt (13), quel produit on peut attendre de la calcination ou cuisson de ce calcaire, et conséquemment s'il convient au but que l'on se propose de procéder à une analyse complète et concluante. Dans ce cas, si l'on n'a pas une certaine habitude des travaux du laboratoire, il faudra s'adresser à un chimiste de profession ; ce sera, dans tous les cas, le parti le plus sûr, car les traités de chimie ne peuvent pas tout dire, et sans une certaine habitude il serait difficile, avec leur seul secours, de se tirer convenablement d'une analyse tant soit peu compliquée.

Une précaution essentielle, que nous recommandons à ceux qui ont intérêt à connaître la composition homogène d'une roche argilo-calcaire en place, c'est de ne pas la juger par celle de ses affleurements ; on devra l'attaquer assez profondément pour arriver aux parties que l'air, la pluie et la gelée, n'ont jamais pu atteindre ; les modifications chimiques produites par ces intempéries sont souvent considérables ; il en résulte ordinairement un grand appauvrissement en carbonate de chaux.

III.

TRANSFORMATION DES SUBSTANCES CALCAIRES EN CHAUX,

PAR LA CALCINATION.

11. — Cette transformation est fondée sur la propriété qu'a la chaleur, lorsqu'elle est poussée au rouge vif, de dégager l'acide carbonique des substances calcaires, en laissant la chaux pour produit.

A feu égal, la cuisson s'opère d'autant plus vite, que la pierre est d'un tissu moins serré et d'un plus petit volume. Le calcaire pur, ou à peu près pur, supporte la chaleur blanche sans inconvénient; le calcaire argileux se ramollit et subit une fusion pâteuse d'autant plus facilement dans cette circonstance, qu'il est plus chargé en argile; sa cuisson exige donc une chaleur modérée, dont l'expérience indique le degré d'intensité.

12. — La fabrication de la chaux constitue l'art du chaufournier; nous ne pouvons que renvoyer aux traités spéciaux publiés sur cette matière. On emploie pour combustible, suivant les localités, le bois de corde, le fagot, la bruyère, les houilles sèches, l'anthracite, les lignites et la tourbe, et très-rarement le charbon de bois; le coke convient parfaitement à cette cuisson. La forme des fours varie avec la nature du combustible; pour le bois et la bruyère, qui brûlent avec une longue flamme, on construit, en briques ou autres matériaux aussi réfractaires que possible, de vastes chambres, tantôt prismatiques, tantôt cylindriques, beaucoup plus hautes que larges, avec une ouverture plus ou moins étroite dans le bas; on les remplit de pierres réduites au volume du petit moellon, et de telle sorte, que la charge soit portée sur une ou deux petites voûtes construites à sec, avec les matériaux de la fournée les plus convenables à cette construction. L'entrée de ces voûtes correspond à celle de l'ouverture ménagée dans le bas du four; c'est le foyer où se brûle le combustible dont la flamme, s'insinuant par les vides des petites voûtes, porte de proche en proche l'incandescence dans toutes les parties du chargement (*b*).

Le temps qu'exige la cuisson varie, selon la qualité du bois, de 100 à 150 heures pour un four de 75 à 80 mètres cubes de capacité; c'est par le tassement de la charge, arrivé de 1/6 à 1/5 de sa hauteur, que les chaufourniers jugent la cuisson terminée; chaque mètre cube de chaux exige en moyenne 1 stère 66 de bois de corde essence chêne, 22 stères de fagots ordinaires, et 30 stères de paquets de genêts ou bruyère. Ces chiffres, on le comprend,

---

(*b*) Voyez les ***Recherches sur la chaufournerie, faites au port de Brest***, par M. Petot, ingénieur des ponts et chaussées. (Paris, 1833.)

peuvent varier par une foule de circonstances, dépendant de la qualité du bois, de la grosseur et de la densité de la pierre.

Avec les combustibles sans flamme, tels que le coke, la houille sèche et l'anthracite, la pierre, réduite par le cassage à la grosseur du poing, se cuit au contact même du combustible dans des fours de forme ovoïde ou de cône renversé en entonnoir; les chargements se font par assises alternatives de pierre et de charbon, et par le haut, au fur et à mesure que la pierre cuite est retirée par le bas; on brûle, en moyenne, 1/3 de mètre cube de houille sèche ou d'anthracite par mètre cube de pierre. Avec le secours de la vapeur d'eau introduite dans l'air qui alimente la combustion, les combustibles ci-dessus jettent de longues flammes et peuvent être employés comme le bois.

13. — Les diverses chaux produites par la cuisson des pierres calcaires sont classées dans l'art de bâtir en *chaux grasses*, *chaux maigres* et *chaux hydrauliques*. On a remarqué qu'à composition égale, les chaux hydrauliques sont, pour l'emploi en eau douce, meilleures cuites au bois qu'au charbon; cela peut tenir, principalement, au degré d'intensité de la chaleur produite; la meilleure chaux, pour l'emploi spécifié, serait celle pour laquelle une chaleur modérée, correspondant au rouge qui succède au rouge sombre, aurait été soutenue assez longtemps pour en expulser tout l'acide carbonique; cette observation serait en défaut pour l'eau de mer.

Les chaux grasses sont ainsi nommées parce qu'elles se résolvent par le concours d'une quantité d'eau suffisante en une pâte fine, grasse et très-foisonnante; cette pâte reste indéfiniment molle dans les lieux humides, hors du contact de l'air, et conséquemment dans l'eau, où elle se dissout peu à peu et finit par disparaître.

Les chaux maigres sont ainsi nommées parce qu'elles se résolvent, dans les mêmes circonstances, en une pâte courte, peu foisonnante, n'ayant ni le liant ni l'onctuosité des chaux grasses; elles sont fournies par les calcaires chargés en sable plus ou moins fin, le plus souvent uni au péroxyde ou au protosilicate de fer, et aussi par les dolomies ou calcaires magnésiens; ces chaux se comportent d'ailleurs dans l'eau comme les chaux grasses.

Les chaux hydrauliques sont ainsi nommées parce que la pâte qui résulte

de leur extinction dans l'eau jouit de la propriété de durcir sous ce liquide (*c*), ainsi que dans les lieux humides privés ou non privés d'air, contrairement à ce qui a lieu pour les chaux grasses et les chaux maigres. Ces qualités précieuses sont dues à l'argile qui imprègne les substances calcaires en proportions variables de 12 à 20 parties pour 100. La pâte qu'elles fournissent par l'extinction ordinaire (19) n'est jamais aussi fine ni aussi foisonnante que celle des chaux grasses ; leur énergie, ou degré d'hydraulicité, se mesure généralement par la quantité d'argile qu'elles renferment, comparée à la chaux caustique représentée par l'unité ; on désigne, conséquemment, sous le nom d'*indices d'hydraulicité*, les fractions qui résultent de ce rapprochement, ce qui a conduit à classer ces chaux en *éminemment*, ou *moyennement*, ou *faiblement hydrauliques*, selon que leurs indices sont compris entre 0,36 et 0,40, ou entre 0,30 et 0,36, ou entre 0,24 et 0,30 ; chiffres qui répondent à des doses d'argile de 17 à 20, ou de 15 à 17, ou de 12 à 15 pour 100 parties de calcaire argileux.

14. — La classification précédente suppose l'intervention d'une argile à peu près pure et d'une composition moyenne différant peu de celle du bisilicate, tenant 64 parties de silice et 36 d'alumine ; mais il n'en est pas toujours ainsi : cette composition peut varier entre des limites assez étendues. La pratique a donc besoin d'une seconde classification plus précise que celle qui résulte des indices calculés comme ci-dessus ; voici le moyen usuel qu'elle emploie depuis longtemps : la chaux récemment cuite, étant éteinte par le procédé ordinaire (19), en pâte ni trop ferme ni trop molle, puis logée au fond d'un vase quelconque sous une eau potable, passera graduellement de cet état pâteux à ce premier degré de cohérence qu'on appelle la *prise*. Cela étant, nous disons qu'une chaux est éminemment hydraulique quand la pâte, ainsi immergée, fait prise du deuxième au sixième jour, suivant la saison (car la température de l'eau exerce une influence très-marquée) ; et quand,

---

(*c*) En les nommant ainsi, on a sacrifié le sens étymologique à l'usage, qui applique la qualification d'hydraulique aux travaux exécutés dans l'eau ; le nom d'*hydrolithes*, formé du grec ὕδωρ *eau*, et λίθος *pierre*, en indiquant la propriété caractéristique de ces chaux de devenir pierres sous l'eau, eût satisfait à la double exigence, sans trop s'écarter du mot en usage.

après un mois, elle est déjà dure et superficiellement insoluble, et enfin lorsque après six mois elle donne des éclats par le choc.

La cohésion qui constitue la prise se mesure au moyen d'une aiguille à tricot d'un peu plus d'un millimètre de diamètre, limée carrément à l'une de ses extrémités, et engagée par l'autre dans un culot de plomb du poids de 0k30; il y a prise quand la pâte, de molle qu'elle était, parvient à porter cette aiguille sans dépression sensible.

En suivant toujours le même mode d'essai, nous disons qu'une chaux est moyennement hydraulique quand sa prise n'a lieu que du sixième au huitième ou neuvième jour, et lorsque après quatre à cinq mois sa consistance est comparable à celle que prend à l'air une pâte argileuse pétrie à bonne consistance, et qu'enfin sa surface n'abandonne plus de chaux au bain d'immersion.

Les chaux faiblement hydrauliques, dans les mêmes circonstances, ne feront prise que du neuvième au quinzième jour; leur consistance après six mois ne dépassera pas celle du savon sec, et l'eau d'immersion pourra se couvrir encore d'une pellicule de chaux carbonatée.

L'insolubilité des surfaces baignées ne prouve pas qu'intérieurement, même chez les meilleures chaux hydrauliques, il n'y ait de la chaux soluble; nous n'en avons trouvé aucune qui, prise à une certaine profondeur au-dessous de ces surfaces, n'ait pas changé l'eau distillée en eau de chaux, même après plusieurs années. Le degré d'insolubilité des parties en contact avec l'eau pourrait servir à apprécier la stabilité chimique des chaux hydrauliques, et à mesurer ainsi leur énergie par un moyen différent des moyens physiques fondés sur la dureté acquise; il s'agirait de recueillir toute la chaux dissoute dans des bains d'eau distillée, renouvelée jusqu'au moment où elle ne se troublerait plus par l'oxalate d'ammoniaque. La totalité de cette chaux perdue, divisée par la surface mouillée exprimée en centimètres carrés, donnerait le degré de solubilité rapporté à cette unité de surface pour les chaux que l'on aurait à comparer.

Si nous passons de ces considérations générales aux exceptions, nous ferons remarquer que l'appréciation d'une chaux hydraulique, par le seul temps de sa prise telle que nous l'avons définie, peut quelquefois être en défaut, surtout chez les chaux éminemment siliceuses, où l'alumine n'entre

que pour 1/4 ou 1/5 dans la composition de l'argile ; quelques exemples compléteront cette observation.

Soit la composition fictive suivante, de trois substances calcaires, dont les argiles correspondent en constitution chimique aux silicates à un, à deux et à trois atômes de silice pour un atôme d'alumine.

	N° 1.	N° 2.	N° 3.
Carbonate de chaux..	80,00...	80,00...	80,00
Silice.............	9,40...	12,80...	14,60
Alumine...........	10,60...	7,20...	5,40

Dans ces exemples, la vitesse de prise irait en décroissant, du n° 1 au n° 3, et le degré d'énergie, ou, plus exactement, la cohésion finale des mortiers à sable, composés avec les chaux provenant de ces calcaires, irait, au contraire, en croissant, du n° 1 au n° 3.

La chaux de ce n° 3 se rapprocherait beaucoup des chaux de l'Ardèche, de la Drôme et de Sassenage, dans l'Isère, chaux justement renommées dans le midi de la France.

Il suit de là qu'un excès d'alumine dans les chaux hydrauliques en accélère le durcissement au début, tandis que la surabondance de la silice le retarde, mais pour reprendre finalement tout l'avantage.

Le pèroxyde de fer, le manganèse, le quartz à l'état de sable, qui souillent les argiles grossières, sont au moins inertes et souvent nuisibles ; ils modifient d'une manière fâcheuse les qualités des chaux hydrauliques ; il est entendu, en conséquence, que ces principes, étrangers à l'argile proprement dite, ne doivent pas concourir à la formation des indices d'hydraulicité, ceux-ci ne devant être que des rapports entre la chaux caustique et la silice, l'alumine et la magnésie, quand il y en a.

15. — On rencontre quelquefois des substances calcaires tenant, indépendamment d'une certaine quantité d'argile, du carbonate de magnésie ; quand ces calcaires, pour 20 à 25 parties de ce carbonate, renferment d'ailleurs de 10 à 14 parties d'argile et de 65 à 66 de carbonate de chaux, on peut en tirer par la cuisson d'excellentes chaux hydrauliques qui prennent alors le nom de chaux magnésiennes, et qu'il ne faudrait pas confondre avec les chaux dolo-

mitiques, provenant des dolomies proprement dites, lesquelles ne contiennent ni silice ni alumine, et conséquemment ne sont pas hydrauliques.

16. — De tout ce qui précède, il résulte qu'il ne peut y avoir de chaux hydrauliques sans silice, et que, considérées chimiquement, ces chaux, sortant du four, sont de véritables silicates formés par voie sèche.

IV.

CHAUX HYDRAULIQUES ARTIFICIELLES.

17.— Puisque les chaux hydrauliques résultent de la cuisson des substances calcaires naturellement mélangées d'argile, on doit pouvoir obtenir des chaux semblables en imitant artificiellement ces mélanges dans les proportions voulues, et en les soumettant à la cuisson ; l'expérience ne laisse aucun doute à cet égard, et cette fabrication, dont l'invention nous est due, forme depuis 1820 une branche d'industrie très-utilement exploitée à Paris et ailleurs.

On choisit pour cela des calcaires très-tendres, tels que craies, tufs ou marnes friables, faciles à broyer et susceptibles de former pâte fine et liante avec l'eau ; on se procure en même temps une argile aussi pure que possible, ou tout au moins une bonne terre à poterie ; on règle, d'après la composition chimique des deux ingrédients, la proportion pour laquelle chacun d'eux doit entrer dans le mélange ; on opère ce mélange tantôt par des meules ou roues verticales, liées à un système de herses ou de râteaux, et tournant ensemble au moyen d'un manége dans des auges circulaires où l'eau arrive par un robinet ; tantôt par des meules horizontales ou par d'autres procédés.

La qualité des chaux artificielles dépend autant de l'intimité du mélange que du choix et des proportions des matières ; le mélange s'effectue d'autant plus vite et d'autant plus exactement, qu'on lui donne une consistance plus voisine de celle d'une forte bouillie ; mais il faut ensuite rapprocher les parties pour

les amener à un degré de densité qui en permette le moulage en pains ou mottes destinées à la cuisson.

On y parvient par des moyens assez divers, selon l'étendue du terrain dont on dispose et selon la saison. Ces moyens sont plus ou moins expéditifs; en été, la bouillie étalée sur des aires couvertes en dalles atteint promptement une consistance forte; le procédé qu'on employait à Paris, quand cette industrie prit naissance, consistait à écouler, par un orifice de fond, la bouillie du bassin de mélange dans des fosses échelonnées à la suite les unes des autres et communiquant ensemble par le haut; quand la première était pleine, la nouvelle bouillie venant du bassin, ainsi que les eaux surnageantes, s'écoulaient dans la seconde, et de celle-ci remplie dans la troisième, etc., jusqu'à la dernière déversant ses eaux surnageantes dans un puisard.

D'autres fosses semblablement disposées recevaient les produits du manége pendant que la matière prenait, en se tassant naturellement dans les premières, la consistance nécessaire au moulage; la pâte, ainsi concentrée, était divisée en mottes à l'aide d'un moule et d'une manière très-expéditive; celles-ci, étalées au soleil sur une aire ou à couvert sous des hangars, selon le temps et la saison, y acquéraient par dessication la consistance voulue pour la cuisson, effectuée d'ailleurs comme pour les chaux naturelles.

Il existe beaucoup d'autres moyens d'opérer les mélanges, quand on peut disposer de puissantes forces motrices, et de donner aux pâtes, de prime abord, la consistance que réclame le moulage; l'industrie est assez avancée, sous ce rapport, pour que nous n'ayons rien à lui apprendre.

18. — On ne trouve pas partout des calcaires assez tendres pour être broyés et réduits en pâte fine avec l'eau; on y substitue alors la chaux grasse elle-même qui, éteinte, soit en pâte, par le procédé ordinaire (19), soit en poudre, par immersion ou aspersion (20), se prête à un mélange bien plus intime avec l'argile que la craie.

Dans ce cas, et lorsque l'argile est à peu près pure, il faut, pour obtenir une chaux éminemment hydraulique, en prendre de 40 à 44 parties censées anhydres pour 100 parties de chaux censée vive ou caustique; dans l'emploi de la craie pure et anhydre, 178 parties représenteront 100 parties de chaux caustique.

Mais il n'arrive presque jamais de rencontrer la craie et l'argile parfaitement pures et sans eau latente; il faut donc se rendre compte de cette quantité d'eau et du degré d'impureté (10) de part et d'autre, si l'on tient à l'exactitude des dosages, d'où dépend la qualité de la chaux produite.

Les chaux hydrauliques artificielles ont rendu à Paris d'immenses services aux travaux publics et particuliers; on en a fait une énorme consommation pour les fortifications (*d*). Elles pourraient, à défaut de chaux siliceuses naturelles (14), analogues aux chaux du midi, servir utilement aux travaux à la mer, si, pour les fabriquer, on parvenait à trouver des argiles ou autres substances plus riches en silice que ne le sont les argiles ordinaires les mieux partagées sous ce rapport. Il faudrait demander la silice à certaines formations crayeuses, où elle se trouve à l'état gélatineux ou semi-gélatineux, en proportion de 35 à 40 pour cent.

Un ingénieur piémontais d'un grand mérite, M. Signorile, dans un très-intéressant Mémoire, a signalé l'influence particulière exercée par la nature du combustible sur les qualités de certaines chaux artificielles résultant de la cuisson d'un mélange, en bonnes proportions, d'argile et de chaux tirée de dolomies (15); il a reconnu que ce mélange, cuit au bois, donnait une bonne chaux hydraulique, tandis que, cuit à la houille contenant des sulfures, cette chaux, après avoir fait sa première prise (14) en deux jours, tombait en boue le cinquième.

L'analyse comparée des deux produits signalait dans le dernier une notable quantité de sulfate de chaux n'existant pas dans le premier; d'un autre côté, un calcaire argileux, exempt de magnésie, cuit aussi avec la même houille, et chargé aussi en sulfate de chaux, ne présentait dans les mêmes circonstances aucun symptôme de boursouflement. Nous nous bornons à rapporter ces faits singuliers, dont la responsabilité reste à l'habile observateur de qui nous les tenons.

(*d*) Le conseil municipal de la ville de Paris, frappé des avantages et des économies dus à l'emploi des chaux hydrauliques artificielles, dans les travaux exécutés sur son budget, a décerné à l'inventeur, en 1844, une coupe d'argent avec l'inscription suivante : « LA VILLE DE PARIS, A L.-J. VICAT, EN COMMÉMORATION DES BELLES DÉCOUVERTES « QU'IL A FAITES CONCERNANT LES CHAUX, LES BÉTONS ET LES MORTIERS HYDRAULIQUES. » — (*Note de l'éditeur.*)

V.

EXTINCTION DES CHAUX VIVES.

19. — Toutes les chaux prises au sortir du four, ou très-peu de temps après, et jetées dans un bassin plein d'eau, éclatent avec bruit, se gonflent et tombent en bouillie avec un dégagement de chaleur qui produit une sorte d'ébullition ; ce phénomène varie d'intensité selon la nature de la chaux ; il est en général bien plus prononcé pour les chaux grasses que pour les chaux hydrauliques. L'extinction, ainsi pratiquée, prend le nom d'extinction *ordinaire* ou *à grande eau.*

Réduites de cette manière en pâte ou en bouillie épaisse, selon la quantité d'eau employée, les chaux, de vives qu'elles étaient, deviennent ce qu'on appelle, en termes de chantier, *chaux fondues*, *chaux coulées* ou *chaux fusées*. On peut, sous cette forme, leur donner une consistance très-forte ou la fluidité d'un coulis : tout dépend de l'emploi auquel on les destine.

Le foisonnement, ou volume des chaux ainsi éteintes, est évidemment en raison inverse de la consistance pâteuse à laquelle on s'arrête ; mais, à égale consistance, les chaux grasses foisonnent beaucoup plus que les chaux hydrauliques ; les premières rendent en pâte, ni trop molle ni trop ferme, de deux à deux volumes et demi, pour un de chaux vive mesurée en pierres avec vides ; les dernières, dans les mêmes circonstances, ne rendent que de un à un volume et demi.

En général, 100 kilog. de chaux grasse très-pure et très-vive donnent en fraction de mètre cube $0^{m}24$ en pâte ; mais, quand la cuisson date de plusieurs jours et que la chaux n'est pas très-pure, ce chiffre descend à $0^{m}18$; entre ces limites, se trouvent toutes les variations de foisonnement propres à ces espèces de chaux.

Les densités des chaux hydrauliques et leur composition sont trop variables

pour permettre d'assigner entre des limites aussi voisines des rapports analogues aux précédents, entre leur poids et leur foisonnement, par l'extinction ordinaire.

20. — Si, au lieu de laisser les chaux vives s'éteindre sous une suffisante quantité d'eau, on se contente de les y plonger pendant quelques secondes, et de les en retirer subitement avant tout commencement de fusion pâteuse, elles sifflent, éclatent avec bruit, répandent des vapeurs brûlantes et tombent en poussière ; on arrive au même résultat par une aspersion sur la chaux vive éparpillée sur une aire. Dans tous les cas, il est bon d'entasser immédiatement la chaux pour concentrer la chaleur dégagée; par là, on facilite et on accélère la réduction en poudre. Ainsi réduites, les chaux ne s'échauffent plus avec l'eau; elles en retiennent, quand il s'agit de chaux grasses, de 18 à 20 parties pour 100, et de 20 à 30 si elles sont hydrauliques. C'est là ce qu'on appelle l'*extinction sèche, par immersion ou aspersion.*

Dans quelques localités, on met la chaux en tas à mesure qu'on l'arrose, et on la couvre de sable frais sous lequel elle tombe en poudre, et se conserve assez bien pour fournir à la consommation de plusieurs jours.

21. — Si l'on réduit 100 kilog. de chaux grasse en pâte molle par l'extinction ordinaire, et la même quantité en pâte de même consistance, obtenue par le gâchage de la poudre d'extinction sèche, suffisamment refroidie, les volumes de ces pâtes seront dans le rapport de 100 à 58, d'où il suit que deux volumes égaux de pâte de chaux grasse d'égale consistance, préparés, l'un par le procédé ordinaire d'extinction, l'autre par immersion ou aspersion, contiendront des quantités de chaux dans le rapport de 100 à 161, et des quantités d'eau dans celui de 100 à 93.

Ces différences s'observent dans le même sens chez les chaux hydrauliques, mais sont beaucoup moins tranchées et varient nécessairement avec leurs indices d'hydraulicité, c'est-à-dire avec la dose d'argile que contient chacune d'elles. Il n'en résulte pas moins que l'extinction à grande eau est celle qui divise le mieux toute espèce de chaux, et en porte le foisonnement au plus haut degré.

Lorsque l'eau vient à manquer sur quelques points, dans l'extinction ordi-

naire, on voit la chaux y fuser à sec, et si, pour obvier à cet inconvénient, on y projette de l'eau froide, la chaux, atteinte au fort de son effervescence, tombe en grumeaux qui restent dans la pâte ; il faut se garder surtout de cette sorte de malfaçon quand la chaux est destinée à blanchir les murailles ou à entrer dans la composition des enduits.

22. — Il est un troisième mode d'extinction, que nous nous bornerons à mentionner, par la raison qu'on n'en fait pas usage : c'est l'extinction spontanée ou naturelle, que toute chaux vive éprouve à l'air, dont elle soutire l'acide carbonique et l'humidité ; par là, ces chaux tombent en poudre d'une grande finesse et se modifient essentiellement en qualité.

Il ne faut pas moins de trois mois pour que cette extinction spontanée soit complète, sur une chaux grasse dont les pierres, à l'état de chaux vive, ont été réduites à la grosseur d'un œuf. Après ce laps de temps, les poussières, sur 100 parties, contiennent de 10 à 11 parties d'eau et de 26 à 27 parties d'acide carbonique, ce qui constitue des espèces de sous-hydrocarbonates où la chaux caustique serait à l'acide comme 630 à 265 ; il y aurait un peu plus de la moitié de l'acide nécessaire à la complète saturation de la chaux.

Parvenues au terme de cette extinction naturelle, les chaux grasses font avec le sable de bien meilleurs mortiers que lorsqu'on les éteint artificiellement ; mais la lenteur avec laquelle elles arrivent à ce terme ne permet pas d'y avoir recours dans les applications.

Les chaux hydrauliques perdent, par l'extinction spontanée, la presque totalité de leurs propriétés spéciales.

Nous ne devons pas omettre de dire que l'extinction dont il s'agit doit, pour répondre aux observations précédentes, s'opérer à couvert.

VI.

CONSERVATION DES CHAUX SUR LES ATELIERS.

23. — La faculté des chaux grasses éteintes à grande eau, de rester indéfiniment molles dans des fosses imperméables où on les recouvre de terre ou

de sable frais, permet d'en approvisionner ainsi de grandes quantités; ce moyen ne peut malheureusement convenir aux chaux hydrauliques, dont les pâtes durcissent si rapidement, qu'après quelques jours il ne serait plus possible de les broyer; il faut donc ou employer ces dernières à mesure qu'elles arrivent sur les ateliers, ou les conserver, soit vives en pierres, soit en poudre provenant de l'extinction sèche.

Pour les conserver vives, il faut en éteindre en poudre une quantité suffisante pour former, sur l'étendue du sol à couvert dont on dispose, un matelas de 15 à 20 centimètres d'épaisseur; sur ce matelas tassé, on empile la chaux en pierres, en serrant celles-ci à coups de masse pour en diminuer les vides; puis, quand le tas est fini, on le recouvre, de toutes parts, d'une couche de la même chaux en poudre dont on a formé le matelas; cette poudre se loge en partie dans les vides et domine en sus toutes les surfaces; on lisse, avec le dos d'une pelle, la superficie de cette espèce de manteau, qui doit avoir une quinzaine de centimètres d'épaisseur, afin d'intercepter autant que possible l'entrée de l'air humide dans l'intérieur, et on étend sur le tout de vieilles toiles, si l'on en a.

La chaux vive, ainsi enveloppée, peut se maintenir sans altération trop sensible pendant cinq à six mois. La poudre enveloppante elle-même ne se détériore que sur une faible épaisseur, qui passe à l'état de croûte carbonatée. Ces sortes d'approvisionnements doivent reposer sur une aire très-sèche et sous des hangars bien couverts et clos de toutes parts; une seule gouttière pourrait causer un incendie.

Le succès serait plus certain si, indépendamment des précautions indiquées, on pouvait loger toute la masse dans des encaissements en planches bien jointives. La chaux, ainsi conservée, ne s'éteint plus, après quelques mois, avec la même promptitude et la même effervescence qu'au sortir du four; elle devient ce qu'on appelle paresseuse et ne se résout en pâte qu'après plusieurs heures et quelquefois toute une journée.

24. — On conserve les chaux éteintes en poudre bien plus facilement que les chaux vives; mais on a besoin, alors, d'emplacements très-vastes; il n'y a pas d'autres précautions à prendre que de tasser, autant que possible, la poudre accumulée, et de la couvrir de vieilles toiles, si l'on en a. Cependant,

si l'emploi n'en devait avoir lieu que très-tard, il faudrait la loger dans des futailles ou dans de vastes encaissements en planches bien jointives.

Ce n'est que sous cette forme pulvérulente, due à l'extinction sèche, que les chaux peuvent se transporter au loin; on les expédie ainsi en futailles ou en sacs; elles peuvent alors traverser les mers. Les grandes fabriques de chaux hydrauliques sont munies de tous les appareils nécessaires à ce mode d'exploitation; les chaux, après leur réduction en poudre, passent par divers blutoirs qui en séparent les parties solides provenant d'un défaut de cuisson ou de la composition hétérogène de certains noyaux dont les masses calcaires sont souvent pénétrées. Les poudres tombent de ces blutoirs dans de vastes chambres bien closes, et de là par des trémies dans les sacs ou futailles à mesure qu'on les expédie. Les fabriques de Doué, de Paviers et du Theil, sont parfaitement organisées sous ce rapport.

VII.

PRÉPARATION DES CHAUX HYDRAULIQUES

POUR LA CONFECTION DES MORTIERS.

25. — Quand les chaux hydrauliques ne sont point expédiées en poudre, par les grandes exploitations, et qu'elles arrivent en pierres des fours les plus voisins, pour être employées immédiatement, ou après quelques jours seulement, il convient de les éteindre par le procédé ordinaire.

On creuse alors deux bassins contigus dans un sol peu perméable que l'on peut, au besoin, revêtir en maçonnerie; on jette à la pelle, dans l'un des deux, la chaux en pierres, en l'étendant par couches de 20 à 25 centimètres d'épaisseur au plus; on y amène l'eau successivement, de manière à affleurer seulement chaque couche à mesure que la précédente a reçu ce qu'elle peut absorber, et ainsi de suite jusqu'à ce que le bassin soit rempli; on obtient, de cette manière, une extinction uniforme en pâte de bonne consistance.

Ordinairement, la première couche commence à fuser avant qu'on ait étendu la seconde, et successivement ; mais il peut arriver que la chaux soit paresseuse et que l'extinction marche plus lentement : on n'en doit pas moins continuer à charger le bassin, sans attendre la fusion des couches inférieures ; il est rare qu'après vingt-quatre heures toute la masse qui a reçu la quantité d'eau convenable ne soit pas réduite en une pâte propre à la confection immédiate du mortier.

Pendant le cours de l'extinction, on voit quelquefois, à la surface, des pierres de chaux vive fuser à sec ; il faut s'empresser d'y diriger l'eau par des rigoles tracées légèrement sur la pâte, et se garder de noyer celle-ci en la brassant à grande eau, comme font les maçons. Pour s'assurer des points où l'eau aurait pu manquer, on y enfonce un bâton ; s'il en sort enduit d'une chaux gluante, l'extinction y est complète ; s'il s'échappe du trou fait par le bâton une fumée farineuse, c'est une preuve que l'eau y a manqué, alors on l'élargit et on y dirige l'eau.

On ne doit éteindre de cette manière que la quantité de chaux dont on a besoin pour la consommation d'un à deux jours au plus, attendu qu'un séjour trop prolongé dans le bassin lui ferait perdre la faculté de pouvoir revenir à l'état de pâte molle par la seule action du rabot ou de la roue à manége, sans addition d'eau ; et ce serait alors une chaux en partie avariée. On doit donc, quand l'un des deux bassins est près d'être vidé, remplir l'autre de manière que la chaux ait toujours de douze à quinze heures d'extinction avant l'emploi, pour donner aux parties paresseuses le temps de se réduire, et afin qu'il n'y ait aucune discontinuité dans la fabrication du mortier.

26. — Il est impossible que la chaux, en sortant des fours, soit toute bien également cuite et exempte de parties hétérogènes rebelles à la cuisson ; il en résulte qu'à la suite de l'extinction pratiquée sur les chantiers, quel qu'en soit le mode, on trouve dans les pâtes ou dans les poudres beaucoup de fragments solides appelés tantôt *incuits*, tantôt *biscuits*, et en dernier lieu *grappiers ;* les uns jouissent, lorsqu'on les pulvérise, de la propriété des ciments (53) ; les autres sont susceptibles, comme les chaux limites (52), d'une extinction très-lente ; les autres enfin se comportent d'une manière tout à fait passive. La difficulté d'un triage, son impossibilité même, dans la plupart des cas,

exigent qu'on les rejette sans distinction ; la non-observation de cette mesure de prudence peut causer quelquefois la dégradation des maçonneries.

Quelques fabricants de chaux hydrauliques, pour ne rien perdre, ont pris le parti de les faire moudre vives avec leurs grappiers et de les expédier ainsi. Or, indépendamment de l'inconvénient dont on vient de parler, il en est un autre pour le consommateur, celui d'employer une chaux amaigrie par la présence de parties non fusantes et ne pouvant recevoir autant de sable que si elle était pure. Ce procédé, il faut bien le dire, est une véritable falsification dont le consommateur ne peut jamais bien apprécier les conséquences (*e*).

(*e*) Voici des faits positifs sur l'action des grappiers introduits en poudre dans les chaux franches éminemment hydrauliques dont ils proviennent, alors même qu'ils se trouvent dans les conditions les plus favorables, c'est-à-dire constitués comme ciments :

EXPÉRIENCES DE GRENOBLE.

Cohésion par centimètre carré, après dix mois d'immersion, d'une chaux franche, siliceuse et éminemment hydraulique, éteinte à l'ordinaire en bonne pâte..	10^k	17
Id. de la même, avec ses grappiers en proportion de 13 pour 100 de chaux franche........	7	27
Id. des grappiers employés seuls comme ciment........	7	71
Id. du mortier tenant 2 vol. de sable quartzeux et 1 vol. de chaux franche en pâte........	7	63
Id. du mortier tenant 2 vol. de sable et 1 vol. de chaux avec ses grappiers	7	59

EXPÉRIENCES DE TOULON, PAR M. NOEL.

Cohésion par centimètre carré, après un an d'immersion, d'un mortier composé de dix litres de sable et de 3 kil. de chaux du Theil, blutée sans grappiers...	4	78
Id. avec 3 kil. 30 de la même chaux........	5	37
Id. avec 3 kil. 60 de la même chaux........	5	40
Cohésion dans les mêmes circonstances et mêmes compositions des mortiers à chaux blutée avec ses grappiers, en proportion de 12 pour 100.	4 4 4	44 34 76

Ces expériences prouvent qu'il y a plus à perdre qu'à gagner à introduire sous forme pulvérulente les grappiers ciments, et à plus forte raison les grappiers suspects, dans les chaux fusantes éminemment hydrauliques dont ils proviennent ; d'où il suit que l'opinion que l'on a cherché à accréditer dans le sens contraire est tout à fait erronée.

27. — Quand les chaux sont préparées ou fournies en poudre d'extinction sèche, il ne s'agit plus que de les réduire en bonne pâte pour y introduire le sable.

Les chaux seules ne sont guère employées qu'en badigeonnages ou à blanchir les murailles; cette destination exige que la pâte en soit très-fine et sans grumeaux; l'extinction à grande eau est alors celle qui convient le mieux; on choisit ordinairement les chaux grasses, à cause de leur blancheur; on les délaie alors sans inconvénient dans un excès d'eau, de manière à former ce qu'on appelle un lait de chaux, qui d'un premier bassin s'écoule par une vanne de superficie dans un second, en laissant au fond du premier toutes les parties grossières.

Peut-être pourrait-on tirer parti, dans les arts, d'un fait assez remarquable que présente la chaux grasse très-pure, lorsqu'on l'éteint du premier coup en pâte forte, avec la plus petite quantité d'eau possible : si l'on forme, en effet, avec une telle pâte et immédiatement, de petites boules de 5 à 6 centimètres de diamètre, et qu'on les expose à une dessication rapide, même à un soleil d'été, on les voit prendre sur elles-mêmes un retrait considérable, en abandonnant une foule de parcelles superficielles qui n'ont pas pu suivre le mouvement de retrait de la masse; à la suite de ce retrait, il s'opère une cohésion qui engendre une texture compacte susceptible d'un beau poli; ce sont alors de véritables hydrates de chaux qui passent avec le temps à l'état de carbonates neutres, et deviennent ainsi insolubles; en colorant diversement les pâtes avec des ocres et autres couleurs solides, on pourrait essayer de fabriquer à bas prix de petites pièces pour mosaïques.

VIII.

SABLES ORDINAIRES POUR LA CONFECTION DES MORTIERS.

28. — Les sables ordinaires sont fournis par la désagrégation spontanée des roches granitiques, des grès, des calcaires arénacés, et aussi par l'effet

mécanique des eaux sur les dépôts diluviens et les débris de toute nature qu'elles charrient; il y a des sables entièrement quartzeux, d'autres qui se composent de la plupart des éléments des granites ou des gneiss, d'autres entièrement calcaires, et enfin des sables mêlés et des sables volcaniques qui ne possèdent aucune des propriétés reconnues aux sables de même origine, appelés pouzzolanes (73); il y en a de gros, de moyens et de très-fins; on les distingue des poussières en ce que leur grain est palpable et qu'ils se précipitent sur-le-champ lorsqu'on les projette dans une eau claire, sans la troubler notablement. C'est aussi la marque de leur pureté, et cette pureté est elle-même une condition de bonté, car les sables imprégnés de matières terreuses ou limoneuses feraient de très-mauvais mortiers : il faudrait les laver avant l'emploi.

Les sables se tirent ordinairement du lit des fleuves et rivières ou des grèves de la mer; on en trouve aussi là où ne passent aujourd'hui ni fleuves ni rivières; ce sont des sables fossiles qu'il faut distinguer des sables vierges encore sur place, à côté des roches en décomposition qui les produisent. Les sables fossiles offrent généralement un grain plus anguleux, plus inégal, plus rude au toucher que les sables de mer ou de rivière; mais ce sont toujours des éléments quartzeux ou granitiques en proportions dominantes.

Il existe enfin, tantôt non loin de la mer sous forme de dunes, tantôt dans l'intérieur des terres et formant de vastes plaines frappées de stérilité, des masses de sable incalculables.

Tous ces sables sont inertes et n'exercent, chimiquement, du moins pendant un grand nombre d'années et sans intervention de principes étrangers (48), aucune action sur la chaux avec laquelle on les mélange; mais, considérés sous le rapport de l'adhérence physique ou enchevêtrement, c'est-à-dire de la faculté de s'attacher la chaux par leurs aspérités, les sables anguleux exercent une action favorable à la cohésion des mortiers, propriété que ne possèdent pas au même degré les sables à grains polis et arrondis.

IX.

FABRICATION ET EMPLOI DES MORTIERS A CHAUX GRASSE.

29. — Ces mortiers se composent, comme chacun sait, de sable et de chaux en pâte mélangés et gâchés, selon l'usage, en proportions moyennes de deux mesures de sable pour une de chaux.

Les gros sables, pour ces chaux, sont préférables aux fins ; la proportion des uns et des autres peut varier, sans influence bien marquée sur la cohésion du mortier, de 190 à 240 parties en volume, pour 100 de chaux en pâte, quel que soit le procédé d'extinction employé ; à égale grosseur de grain, et quand on a le choix, on doit préférer les sables âpres et rudes au toucher aux sables arrondis, par la raison donnée ci-devant (28).

Pour la chaux, l'extinction sèche est préférable à l'extinction ordinaire ; il en résulte, pour la force du mortier, une augmentation de près des deux tiers ; mais la dépense augmente à raison de la plus grande quantité de chaux introduite, quoique sous un égal volume de pâte (21).

Les mortiers à chaux grasse ont tout à gagner à être corroyés à plusieurs reprises ; ce qui justifie le procédé lyonnais, qui consiste à en fabriquer d'avance de grands tas, d'où l'on tire, en le rendant souple avec addition d'eau, celui dont on a besoin pour la consommation journalière. L'amélioration produite tient à ce fait que nous avons mis en évidence en 1819, savoir que la chaux grasse éteinte à l'air (22) donne de meilleur mortier que préparée par les procédés ordinaires d'extinction, soit en poudre, soit à grande eau ; mais à cette condition expresse que l'extinction spontanée n'ait laissé aucunes parcelles susceptibles de travailler après coup, ce qui entraînerait la ruine des maçonneries ; or, nous avons dit à quelles difficultés pratiques cette condition obligerait (22). La méthode lyonnaise donne accès à beaucoup d'acide carbonique et favorise la réduction définitive des parties paresseuses de la chaux.

L'histoire des mortiers à chaux grasse peut se conclure en peu de mots de ce que l'on observe dans la démolition des vieilles maisons à loyer; cette démolition s'effectue à partir du dernier étage jusqu'au sol, avec la plus grande facilité; le mortier se brise et quelquefois tombe en poussière sous le simple effort d'un balai un peu rude; entre le sol et la base de la fondation, on trouve le mortier très-peu consistant ou très-peu raffermi, s'il ne date que de quelques dixaines d'années; mais il est parfois d'une grande dureté après deux cents ans et plus : nous en dirons plus tard la cause (47-48).

Lorsque les maçonneries à chaux grasse appartenant à une construction quelconque ont été, dès l'origine, en contact permanent dans quelques-unes de leurs parties avec une eau pouvant se renouveler, ces parties sont, après un certain temps, dégarnies de mortier; les pierres de la maçonnerie semblent, selon l'expression technique, avoir été posées à sec; l'eau a donc décomposé et fait disparaître le mortier.

La courte durée des murs de clôture et autres, en butte aux intempéries, atteste d'ailleurs l'insuffisance du même mortier pour cette dernière destination.

30. — En somme donc, les mortiers à chaux grasse, sans la croûte insoluble dont l'acide carbonique revêt leurs surfaces, et sans leur résistance superficielle, par suite, à l'action détrempante de la pluie, ne vaudraient pas un bon pisé. Cependant, comme on s'en contente généralement pour toutes les constructions de peu d'importance, et qu'alors ils suffisent comme remplissage ou suppléant au défaut d'assiette du moellon, nous dirons en quelques mots que, pour les obtenir le moins mauvais possible, il faut prendre le contre-pied de ce que font les maçons, c'est-à-dire qu'au lieu de noyer la chaux dans une grande quantité d'eau en l'éteignant, et de gâcher le mortier à consistance très-molle, presque fluide, il faut employer la chaux en pâte ferme et n'ajouter de l'eau que lorsque le sable, trop sec, l'exige absolument, afin d'obtenir un mortier de bonne consistance; et avec toutes ces précautions, on n'arrivera jamais en pratique à des mortiers dont la cohésion finale soit de plus de 3 kilog. par centimètre carré.

Or, des mortiers que l'eau décompose, que les intempéries détruisent, qui restent faibles et le plus souvent pulvérulents dans les murs abrités des maisons

ordinaires, de tels mortiers ne peuvent convenir aux constructions importantes, et à plus forte raison à celles qui ont uno destination monumentale.

X.

FABRICATION ET EMPLOI DES MORTIERS HYDRAULIQUES.

31. — La qualification d'hydraulique donnée à ces mortiers pourrait faire croire que leur destination exclusive est de lier les maçonneries exposées d'une manière quelconque à l'action de l'eau; ce serait une grande errour, car, bien qu'ils rendent dans ce cas d'immenses services, nous devons dire tout de suite que c'est principalement dans les maçonneries qui ont à subir toutes les vicissitudes atmosphériquos quo leur excellence se manifeste; la dureté à laquelle ils parviennent alors égale celle de la plupart dos pierres calcaires non compactes; elle est, finalement, de 9 kilog. par centimètre carré pour les chaux moyennement hydrauliques, de 15 kilog. pour les chaux éminemment hydrauliques argileuses, et enfin de 17 kilog. pour les chaux de ce rang, où la silice prédomine (14), telles que les chaux de l'Ardèche.

Continuellement placés sous une terre humide ou sous l'eau, les mêmes mortiers, après le même temps, n'atteignent pas le même degré de dureté qu'en plein air sous l'influence des pluies et des rosées; les différences observées sont, pour la terre humide, de 70 à 100, et pour l'eau, de 60 à 100.

La chaux ayant été préparée selon ce qui a été dit (25), sera broyée avec le sable, soit au pilon, soit au manége ou au rabot, et avec le moins d'eau possible; les bonnes proportions pour tout mortier hydraulique sont, en moyenne, de 1 vol. 80 de sable pour 1 vol. 00 de chaux en pâte; on peut s'en écarter un peu, en plus ou en moins, sans un grand inconvénient; mais s'il s'agit de mortiers destinés à l'immersion à travers une eau profonde, il faut assurer la première liaison par un surcroît de 1/6 à 1/5 de chaux en sus de la proportion moyenne, et donner au mortier la plus forte consistance possible,

ce que l'on n'obtient qu'à l'aide du pilon. S'agit-il, au contraire, de mortiers pour conduits ou crépissages destinés à braver les intempéries, il faut forcer la dose de sable et ne pas s'étonner de la maigreur du mélange ; la cohésion finale y perdra quelque chose, mais la résistance à la gelée y gagnera considérablement.

32. — La nature du sable n'exerce pas une influence appréciable sur la bonté du mortier hydraulique, pourvu que le grain en soit palpable, net et dur ; mais il n'en est pas de même de sa grosseur ; nous citerons comme exemples de sables convenant parfaitement aux chaux hydrauliques sous ce rapport, ceux de la Garonne, de la Dordogne, de l'Allier et de la Loire, dans la partie de leur cours assez éloignée des embouchures pour qu'il ne s'y forme pas de dépôts limoneux. Leur grain a moyennement un peu moins d'un millimètre de grosseur. Les sables de la Seine dragués à Paris approchent du menu gravier et sont beaucoup trop gros ; ceux que l'on désigne sous le nom de sablons, et dont l'écoulement mesure le temps dans les sabliers, seraient trop fins ; malheureusement, le choix n'est presque jamais possible.

La cohésion finale d'un mortier hydraulique à sable moyen étant représentée par 100, descendra à 70 par l'emploi d'un très-gros sable, tel que celui de la Seine, et à 50 par l'emploi du menu gravier.

33. — Contrairement à ce qui a lieu pour les chaux grasses, les chaux hydrauliques gagnent à être éteintes par le procédé ordinaire (19) ; il en résulte, pour l'accroissement de cohésion du mortier, une différence peu appréciable dans le cas d'exposition à l'air, mais très-sensible et de 1/5 pour le cas d'immersion constante. Il faut donc, toutes les fois que la chose est possible, préférer l'extinction à grande eau à l'extinction en poudre.

Le mortier hydraulique doit toujours être gâché à couvert quand la saison est pluvieuse, ce qui suppose un sable mouillé ; on ne prend alors que la moitié ou le tiers de la chaux en pâte ordinairement employée, et l'on remplace ce qui manque par la même chaux éteinte en poudre, afin d'absorber l'eau du sable ; sans cette précaution, on n'obtiendrait qu'un mortier délayé. Par un temps sec et chaud, il devient, au contraire, quelquefois indis-

pensable d'ajouter de l'eau, mais avec réserve, car il en faut très-peu pour noyer le mortier.

On insiste sur ces précautions, parce que la consistance donnée au mortier dans le gâchage exerce une grande influence sur sa dureté future ; dans aucun cas on ne doit lui donner ce degré de mollesse qui constitue les bouillies même épaisses ; il faut qu'il tienne bien sur la truelle, sans trop s'y affaisser ; il y a 50 pour 100 à perdre dans la bonté d'une maçonnerie exposée à l'air, par l'emploi d'un mortier noyé ou introduit sous forme de coulis entre les pierres ou moellons dont elle se compose, et 30 pour 100 s'il s'agit de constructions hydrauliques destinées à une immersion constante.

Au degré de fermeté que nous prescrivons, le mortier serait fort mal employé avec des matériaux absorbants et d'ailleurs très-secs, avec la brique surtout ; il faut tenir de tels matériaux dans un état complet d'imbibition jusqu'au moment de l'emploi, en les arrosant de temps à autre, si besoin est ; ils doivent, s'il est permis de s'exprimer ainsi, *suer l'eau*. Le secret d'une bonne maçonnerie est tout entier dans ce précepte : *mortier ferme et matériaux mouillés*. C'est, comme on le voit, le contraire de la manière des maçons, qui semblent avoir pris pour règle : *matériaux secs et mortier liquide*.

Pour maçonner comme on l'entend ici, il faut n'avoir jamais à introduire après coup du mortier entre les pierres qui ne laissent pas un intervalle suffisant pour le recevoir en plein par le lancer de la truelle ; ces joints étroits doivent se garnir dans la pose même par le refoulement latéral du mortier sur lequel on assied le moellon.

Avec des matériaux absorbants, employés mouillés, la main du maçon ne résisterait pas longtemps au contact inévitable de la chaux, si l'on ne trouvait quelque moyen de l'en préserver, soit par des enduits tels que le goudron liquide, soit par des espèces de gants rendus imperméables par les préparations connues de caoutchouc ou de gutta-percha. L'inconvénient, au surplus, n'existe pas quand on maçonne avec des matériaux non absorbants, attendu qu'employés secs ils laissent au mortier toute sa ductilité et son eau de fabrication, en lui permettant de durcir par l'effet d'une action chimique et non par la dessication forcée de la chaux, qui ne produit que pulvérulence.

Une longue expérience nous a démontré que les maçons intelligents et

dociles sont rares ; il en est qui préfèrent quitter le travail à se conformer aux prescriptions qui contrarient leurs habitudes ; l'amour-propre se révolte contre les conseils. Une surveillance active est donc indispensable quand il s'agit de maçonneries importantes.

XI.

ROLE DU MORTIER HYDRAULIQUE DANS LES MAÇONNERIES.

34. — Le mortier hydraulique finit par adhérer aux matériaux, pierres ou briques, avec une force au moins égale à sa propre cohésion ; une maçonnerie à moellons irréguliers doit, pour être bien liée et bien pleine en tous sens, absorber 0^{m}40 de mortier par mètre cube, et si cette maçonnerie doit remplir les fonctions d'un solide monolithe, il faut qu'elle soit bâtie d'une manière continue, et non par assises arasées, méthode qui ne convient qu'aux massifs devant fonctionner comme supports, tels que piliers, murailles d'une grande hauteur, portant combles, planchers et charges permanentes ou accidentelles considérables.

Il existe entre les espaces occupés par la gangue et les matériaux qu'elle enchâsse dans toute maçonnerie monolithe, une relation qui donne à la masse le maximum de résistance uniforme en tous sens ; l'exemple des meilleurs blocages, tant antiques que modernes, semble établir que la force d'agrégation dépend à la fois de l'égalité, de la grosseur et de l'uniforme distribution de ce que l'on pourrait appeler les noyaux de l'agrégat ; elle paraît être à son maximum dans le cas particulier d'un mélange en masse, avec possibilité de massivation ; c'est celui des bétons jetés et battus dans des tranchées de fondation ou dans des encaissements quelconques.

35.— Le mortier hydraulique devenant en plein air, et dans un espace de temps de quinze à vingt mois, aussi dur que la plupart des pierres à bâtir non compactes, il en résulte que la solidité des parements en maçonnerie est

indépendante de la forme des matériaux, et conséquemment qu'il n'est pas du tout indispensable de leur tailler des lits et des joints, à moins que des considérations étrangères à la solidité ne l'exigent; cette taille, d'ailleurs, devient un véritable contre-sens, lorsque ces parements doivent être revêtus d'un enduit ou crépi.

Il est certain que le peu de succès des enduits en général a dû dégoûter de leur emploi, et que, dans la nécessité d'y renoncer, on a cherché à donner aux parements toute la régularité possible, en faisant du moellon une pierre de taille en miniature; mais l'insuffisance des enduits n'est causée que par la trop forte proportion de chaux introduite dans le mortier et par la manière défectueuse dont on l'applique. Tout mortier ayant cette destination doit être maigre et composé avec un sable bien pur, plutôt gros que fin; sa consistance, nécessairement molle, le sera plus ou moins, selon qu'il devra être lancé à la truelle ou au balai; on ne le recoupera dans aucun cas; on cherchera encore moins à l'étendre ou à le comprimer avec la truelle; quand la première couche aura acquis une certaine fermeté, on jettera la seconde, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'enduit ait l'épaisseur et la consistance voulues pour se prêter au dérasement des aspérités, qui s'opérera avec le râcloir appelé ripe.

Un maçon exercé à ce genre de travail parvient à former une surface unie, à pores très-ouverts et très-accessibles à l'acide carbonique; surface sur laquelle on peut figurer un appareil en pierre de taille, en y traçant des assises et en faisant disparaître la couleur grise du mortier sous un badigeonnage.

Ces derniers soins sont superflus dans la plupart des cas où l'ornementation n'est pas commandée; un enduit à aspérités régulières, figurant ce qu'on appelle un parement rustiqué, suffit alors parfaitement.

36. — Tous les mortiers sont attaqués par la gelée, lorsqu'ils n'ont qu'un ou deux mois d'âge; il faut alors chercher à les garantir par des couvertures en paille ou en terre, ou par quelque système de toiture approprié à la forme et à l'étendue des maçonneries. Le mortier hydraulique, mis en œuvre à partir du mois de mars jusqu'à la fin d'août, dans nos climats, résiste ordinairement très-bien aux gelées qui surviennent vers la fin de novembre, et après cette première épreuve, les froids les plus rigoureux n'ont aucune prise sur lui, à

moins d'emploi de mauvais sable dont le grain soit lui-même attaquable, ou de la présence de nombreux grumeaux de chaux dans le mortier, par suite de broyage incomplet ou de mauvaise extinction.

XII.

FABRICATION ET EMPLOI DES BÉTONS A CHAUX HYDRAULIQUE.

37. — De même que la chaux forme la gangue des agrégats de sable appelés mortiers, de même le mortier forme la gangue des agrégats de rocailles, cailloux, débris de carrières et recoupes de chantiers, appelés *bétons*. La condition de rigueur à l'égard de ces matériaux est qu'ils soient durs, non gélisses, et que leur grosseur variable n'excède cependant pas celle des pierres concassées pour l'entretien des routes.

On lie cette blocaille avec du mortier hydraulique, en quantité suffisante pour remplir un peu plus que les vides naturellement formés dans l'entassement à sec de ces mêmes matériaux ; ce mortier doit donc égaler en volume au moins la moitié de celui de la blocaille ; on introduit celle-ci dans sa gangue à l'aide du pilon et de la pelle, si l'on a besoin d'un béton très-ferme, destiné à l'immersion sous une eau profonde. Pour tout autre emploi hors d'eau, on donne au mortier la consistance ordinaire, et on opère l'introduction de la blocaille à la pelle, ou en faisant tomber ensemble blocaille et mortier, de cascade en cascade, dans des augets échelonnés au-dessous les uns des autres ; ou, enfin, par d'autres moyens faciles à imaginer.

38. — De toutes les destinations du béton, l'immersion en eau profonde est celle qui demande le plus de soins et présente le plus de difficultés ; quelques ingénieurs emploient le camion, qui se vide par bascule et verse le béton qu'il contient un peu avant de toucher le fond ; d'autres préfèrent la caisse à soupape, qui s'ouvre en dessous ; la trémie paraît abandonnée. Chacun cite des exemples de succès à l'appui de sa préférence. Il est une considération

capitale qui doit diriger dans le choix des moyens, c'est, en tout état de cause, d'opter pour celui qui maintiendra le béton immergé, au plus près possible de sa consistance de fabrication, en le remaniant le moins possible sous l'eau, et en donnant lieu par conséquent à la moindre formation de laitance possible; tout béton remanié après l'immersion se délave et s'affaiblit proportionnellement.

Quelque soin que l'on prenne, cependant, il y aura toujours de la chaux séparée du mortier sous forme de bouillie claire, nommée laitance; et c'est par cette raison que nous avons recommandé d'en forcer un peu la dose en sus de la proportion ordinaire (31). Cette laitance, lorsqu'il régne un léger courant sur l'enceinte dans laquelle on échoue le béton, est entraînée à mesure qu'elle se forme; mais dans une enceinte bien close, dont l'eau ne peut se renouveler, elle se dépose et finit par s'accumuler à tel point, qu'il devient indispensable de s'en débarrasser. Elle ne provient pas seulement de la chaux délayée, mais encore du soulèvement des vases fluides qui, après les draguages, recouvrent le fond sur lequel on bétonne. D'autres causes, lorsqu'on opère en eau de mer, s'ajoutent aux précédentes; il se précipite une grande quantité de magnésie et de sulfate de chaux à l'état naissant, matières presque gélatineuses et faciles à soulever. En eau douce, les pouzzolanes, lorsqu'on en emploie, donnent lieu aussi à des formations gélatineuses par la combinaison presque immédiate de leurs parties les plus fines avec la chaux. De là, une augmentation notable de cette bouillie fluide qu'il faut absolument enlever.

Cette opération devient plus ou moins laborieuse, selon le mode d'immersion adopté; lorsqu'on procède par couches horizontales, la laitance se dépose uniformément dans les creux résultant des inégalités des surfaces; à chaque couche nouvelle, la quantité en augmente et surnage, mais pas au point de laisser les couches successives se juxtaposer exactement; la laitance qui reste engagée entre elles y produit des solutions de continuité très-fâcheuses pour l'homogénéité et la résistance uniforme de la masse; il importe donc, au fur et à mesure que cette laitance se produit, de la balayer hors de l'enceinte, quand c'est possible, ou de la chasser vers un puisard ménagé à cet effet, et de la pomper; l'opération devient moins difficile, quand le bétonnement, au lieu de se faire par couches horizontales, présente une déclivité vers le puisard.

C'est à cette intention que, dans la remarquable fondation du troisième

bassin de radoub du port de Toulon, M. l'inspecteur général Noël faisait immerger son béton par gradins allongés, donnant lieu à un talus de 28 de base sur 4 à 5 de hauteur, talus qui favorisait l'écoulement de la laitance vers le point d'où elle était aspirée par des pompes dans le système Letestu, parfaites pour cette sorte de travail; il en fut enlevé ainsi une énorme quantité.

M. l'ingénieur en chef Beaudemoulin avait déjà expérimenté avec un grand succès, sur divers travaux, un mode d'immersion encore plus efficace que le précédent. On procédait par une seule couche, mais avec le soin de la composer de bandes partielles, montées du fond jusqu'en haut, en talus de 1 et 1/2 à 2 de base pour 1 de hauteur, et appliquées ainsi les unes contre les autres; or, sous cette inclinaison et à raison de la moindre pesanteur des matières dans l'eau, il n'y avait ni éboulement, ni roulement des blocailles au pied des talus; on avait soin, d'ailleurs, d'employer un béton aussi ferme que possible (*f*), et de ne monter les bandes talussantes que par parties légèrement comprimées; la laitance seule, par sa fluidité, descendait vers le bas et fuyait sans cesse devant le massif à mesure qu'il s'avançait sur toute sa hauteur (*g*).

En voilà assez pour que tout ingénieur reste juge du meilleur parti à prendre; nous nous prononçons formellement, cependant, surtout pour le cas de bétons très-prompts à durcir, contre le procédé qui consiste à déposer les augées sur un même point pour en former une montagne que l'on force à s'élargir circulairement, ou d'arrière en avant, par l'affaissement de sa masse, aidé du poids des nouvelles augées qu'on y dépose et de l'action de la dame; il n'est pas besoin de démontrer que cette expansion du béton ne peut se faire sans que la masse soit à chaque instant désunie et remaniée, ce qui devient une cause puissante d'affaiblissement pour sa dureté future.

39. — Il serait trop long d'énumérer ici tous les services rendus ou pouvant être rendus à l'art de bâtir, par les bétons à gangues de mortier hydraulique, lesquels sont les plus économiques de tous; il nous suffira de dire qu'ils forment les massifs de fondation de la plupart des ponts, écluses, bar-

(*f*) Le pilon seul peut donner au mortier et au béton la consistance voulue pour l'immersion; c'est aussi le moyen d'éviter l'abondance excessive de la laitance.

(*g*) *Annales des ponts et chaussées* de 1850, 2e cahier.

rages et murs de quais fondés depuis 1820 (*h*); qu'on peut les employer en guise de pisé à l'édification de toutes sortes de bâtiments; à la confection des bassins, réservoirs, citernes, fosses d'aisance, carrelages des rez de chaussée, plates-formes des terrasses assises sur voûtes, et enfin à la confection des blocs énormes dont aujourd'hui on forme les môles ou jetées à la mer.

XIII.

EMPLOI DU MORTIER HYDRAULIQUE

A LA CONFECTION DES PIERRES ARTIFICIELLES.

40. — La reproduction multipliée d'un même objet avec un moule unique présenterait à l'emploi du mortier hydraulique des difficultés causées par la lenteur de son durcissement; on ne pourrait guère dépouiller l'objet moulé de son moule avant quatre à cinq mois; mais à part cet inconvénient, qui disparaît d'ailleurs quand il s'agit d'un objet unique, le mortier hydraulique aurait sur d'autres matières plastiques l'avantage d'une résistance et d'une durée monumentales, avantage que ne promet pas toujours l'emploi des ciments (69); toutefois, il ne faudrait pas chercher à appliquer le mortier hydraulique au moulage d'objets déliés et délicats, mais seulement à des formes simples, arrondies et largement prononcées, comme pour grands vases d'ornement dans les jardins, poses simples d'animaux et de statues colossales, etc., etc.

41. — Dans les pays où la pierre de taille est rare, ou même elle manque

---

(*h*) C'est par un bétonnement en mortier hydraulique immergé dans des caisses sans fond échouées sur un roc vif mis à nu par le draguage qu'ont été fondées, de 1816 à 1820, les six piles du pont de Souillac, à des profondeurs de 5 à 7 mètres au-dessous de l'étiage. Cet exemple a fait loi pour la plupart des ponts construits depuis.

complétement, on peut y suppléer par le béton à gangue de mortier hydraulique, moulé dans des fosses pratiquées en terre forte, selon les dimensions et formes voulues; c'est ainsi qu'en Piémont, dans les plaines d'Alexandrie, on fabrique des pierres artificielles pour les parties angulaires des maisons bâties en briques, pour des piles de ponts, pour des coursiers de moulins, etc. Pour cela, on emploie une chaux hydraulique magnésienne tirée des environs de Casal; on l'éteint à l'ordinaire, et on la mêle avec un sable bien pur, à grains inégaux, en donnant à ce mélange beaucoup de soin; on y introduit ensuite une certaine quantité de cailloux, à peu près d'égale grosseur, mais posés à la main, à mesure que le massif moulé prend dans la fosse préparée à cet effet les dimensions qu'il doit avoir.

Les fosses sont creusées à 1^m10 ou à 1^m20 de profondeur, dans un terrain de niveau, à l'abri des inondations; on en humecte les parois, on les lisse à la truelle, puis quand le béton y est confectionné comme il vient d'être dit, on le recouvre d'une épaisseur de terre d'environ 35 centimètres; il reste ainsi enfoui pendant trois ans, mais deux suffisent ordinairement. Sa dureté est telle, alors, qu'on peut en précipiter les blocs les uns sur les autres, de 6 à 7 mètres de haut, sans qu'il en résulte autre chose que quelques écornures.

Le degré d'humidité auquel le béton est soumis pendant ce laps de temps est celui que contient toute terre fraîche sans être détrempée; voilà pourquoi on évite les plaines ou champs sujets à inondations, où le béton se trouverait dans un cas presque équivalent à une immersion complète, circonstance moins favorable au durcissement (31) qu'un degré d'humidité restreint.

42. — Sous l'influence atmosphérique, combinée avec celle des pluies et des rosées, et à défaut de pluies avec des arrosages périodiques, les pierres artificielles de ce genre arriveraient, en moins de temps que sous terre, au degré de cohésion suffisant à leur destination; mais la terre étant le moule où elles peuvent le plus commodément recevoir leur forme, il est tout simple qu'on les y laisse, et d'autant mieux qu'elles n'y occupent aucun espace qui puisse être utilement affecté à d'autres usages, et que la terre qui les couvre et les protége en même temps peut être livrée à la culture ni plus ni moins que toute autre.

XIV.

DE QUELQUES MOYENS D'ACCELÉRER LA PREMIÈRE PRISE DES MORTIERS.

43. — En 1775, Loriot indiquait le mélange d'une certaine quantité de chaux grasse vive réduite en poudre fine, avec un mortier préparé un peu mou à l'ordinaire, pour obtenir, disait-il, des constructions aussi solides que celles des Romains; mais la pulvérisation de la chaux vive devenant une opération très-dangereuse pour la santé des ouvriers, Guyton de Morveau proposa, pour parer à cet inconvénient, de laisser la chaux s'éteindre spontanément dans un lieu couvert, puis, lorsqu'elle était arrivée à l'état de poudre fine, de la revivifier en la calcinant dans un four particulier dont il a donné la description dans le *Journal de physique* d'octobre 1775. Si l'invention Loriot eût pu conduire au résultat qu'il annonçait, on aurait trouvé, sans peine, un procédé d'application moins long et moins pénible que celui de Guyton.

Dans ces derniers temps, on a essayé d'un autre procédé, qui consiste à donner à la chaux vive, mécaniquement réduite en poudre, une *demi-extinction*, en l'étendant sur une aire, en couches peu épaisses, et en l'arrosant d'une pluie d'eau excessivement fine, jusqu'à ce que la poudre, remuée au râteau, commence à se peloter. A ce point d'humectation, elle s'échauffe un peu, puis repasse à l'état de poudre froide. Lorsqu'on la mêle, ainsi préparée, avec le sable, et qu'on gâche le mélange à consistance de pâte molle, il s'échauffe très-sensiblement et fait prise en quelques minutes; cette prise résulte, comme on le voit, d'un complément d'extinction de la chaux aux dépens de l'excédant d'eau compris dans la pâte.

44. — Pour les chaux grasses comme pour les chaux hydrauliques, cette accélération de prise est sans avenir; après vingt-quatre heures, la cohésion qu'elle procure ne dépasse pas 0^k25 par centimètre carré, et le mortier tend à la pulvérulence bien plus que lorsqu'il est confectionné à la manière ordinaire.

Pour les mortiers à chaux grasse placés en lieux humides, caves ou souterrains, cette prise accélérée a quelque utilité ; mais s'il fallait les immerger immédiatement, ils tomberaient en boue; cela pourrait ne pas arriver, par suite d'un certain degré de dessication acquis en plein air avant l'immersion; dans tous les cas, la chaux intérieure non atteinte par l'acide carbonique reste très-soluble et le mortier finit par se décomposer sous l'eau.

45. — Le procédé Loriot, et celui qu'on a cherché à lui substituer, se bornent donc à provoquer chez les mortiers à chaux grasse une première prise assez prompte, sans les améliorer en rien pour l'avenir, sans modifier leur manière d'être vis-à-vis de l'eau et des intempéries, tout en imposant une main-d'œuvre compliquée et inadmissible sur les grands travaux. Ces procédés sont depuis longtemps abandonnés.

XV.

CAUSES CHIMIQUES ET PHYSIQUES DU DURCISSEMENT DES MORTIERS.

46. — Les mortiers, comme on a pu le voir, sont de véritables agrégats de sable, dont la chaux forme la gangue; or, le rôle des gangues dans les agrégats dépend essentiellement de leurs propriétés particulières; elles peuvent, en durcissant, acquérir une faculté d'adhérence plus grande, ou plus faible que leur propre cohésion, ou égale à cette cohésion; elles peuvent augmenter ou diminuer de volume, ou conserver leur volume initial; elles peuvent enfin durcir par l'effet d'une simple dessication ou d'un travail moléculaire produisant une espèce de cristallisation confuse; la force de l'agrégat dépend de toutes ces circonstances. En voici quelques exemples remarquables : le sable introduit dans les gangues de plâtre et d'argile affaiblit notablement la résistance dont elles sont capables employées seules, et d'autant plus sensiblement que son grain est plus gros. C'est ainsi que, gâché seul, le plâtre, qui ne cède qu'à une tension de 15 kilog. par centimètre carré, se rompt sous $6^{k}00$ avec

un volume et demi de sable ordinaire, sous 4^{k}00 si ce sable est gros, et sous 3^{k}00 s'il approche du menu gravier. L'argile, qui dans les mêmes circonstances donne de 4 à 5 kilog. employée seule, descend successivement à 1^{k}33, 0^{k}32 et 0^{k}00 pour les mêmes proportions et grosseurs de sable. Or, le plâtre durcit rapidement par l'effet d'une cristallisation confuse et augmente de volume ; l'argile durcit plus ou moins vite par le seul effet de sa dessication et prend un grand retrait ; voilà deux causes différentes produisant des résultats analogues.

La pire espèce de gangue est donc celle qui joint à un défaut d'adhérence aux corps enchâssés, un retrait considérable, et tel est précisément le cas de la chaux grasse éteinte à grande eau, dans un mortier noyé et exposé à une dessication rapide. On en comprend aisément la raison : les corps agrégés, ne pouvant obéir au mouvement de retrait et de concentration de la masse sur elle-même, brisent ce mouvement et produisent la pulvérulence déplorable qui caractérise nos mortiers ordinaires livrés à la routine des maçons. Tout procédé qui tendra à diminuer ce retrait de la chaux améliorera donc la qualité du mortier, et ce sera le cas de l'extinction sèche et d'un gâchage à bonne consistance, c'est-à-dire avec le moins d'eau possible.

L'intervention de l'acide carbonique, qui peut opérer à la longue de très-bons résultats dans le cas d'emploi spécifié ci-après (47), se borne ici à régénérer incomplétement des parcelles de chaux sèches et désunies, sans pouvoir les lier en même temps au sable et entre elles ; il agit sur elles comme sur les chaux éventées dans les circonstances décrites (22).

47. — Dans les fondations, au contraire, partout où le mortier à chaux grasse peut rester très-longtemps humide sans que la chaux se dissolve, il n'y a point de retrait, et l'acide carbonique, qui tend sans cesse à pénétrer la masse et à opérer la régénération de la chaux en carbonate, donne lieu à une cristallisation confuse, dont l'effet est de provoquer une forte adhérence entre ce corps nouveau et le sable ; mais ce travail intime ne peut avoir de résultats bien appréciables qu'après plusieurs siècles ; il explique la grande dureté de certains mortiers à chaux grasse trouvés dans la démolition de quelques massifs de fondation datant du moyen-âge, et nécessitant l'emploi de la poudre.

48. — On a trouvé, dans certaines localités dépourvues de chaux hydrau-

liques, des mortiers de fondation datant de plusieurs siècles, ne contenant que très-peu d'acide carbonique, et cependant d'une grande dureté. La présence d'une notable quantité de silice, combinée avec la chaux dans ces mortiers, permet de supposer que le sable quartzeux a pu y être attaqué, mais par quels moyens? La présence de la potasse dans les dissolutions salines qui imprègnent les terres des caves et des souterrains et autres lieux profonds, semble pouvoir rendre compte de la formation de ce silicate : les actions chimiques inappréciables, même après quelques années, par la lenteur de leurs progrès, finissent par être très-sensibles après plusieurs siècles, et, dans ce cas, la potasse aurait pu mettre en présence de la chaux une certaine quantité de silice naissante (3) empruntée au quartz.

49. — Le durcissement des mortiers à chaux hydraulique est indépendant de toute intervention de ces agents dus à la nature et au temps; toute chaux hydraulique renferme, convenablement disposés, les éléments de sa solidification par voie humide ; cette solidification, qui s'opère d'ailleurs dans un temps convenable, quoique assez court, ne provoque aucun retrait et détermine une forte adhérence de la gangue au sable. Cette dernière observation est commune à tous les agrégats dont la gangue a pu durcir par l'effet d'un travail moléculaire intime ayant duré un certain temps, car un durcissement trop prompt, comme celui du plâtre, par exemple, n'atteint pas le but. C'est surtout lorsqu'une gangue tend à prendre une structure cristalline bien déterminée que le phénomène d'adhérence est remarquable; on peut s'en rendre compte en examinant attentivement une coupe pratiquée perpendiculairement aux couches successives d'une incrustation naturelle ; on y voit dans quelle progression rapide leur densité augmente, à mesure qu'elles se rapprochent du corps incrusté, au contact duquel cette densité est à son maximum.

50. — Telles sont les considérations par lesquelles on peut expliquer le durcissement séculaire des mortiers à chaux grasses, placés dans les conditions d'emploi posées ci-devant (47-48), et celles des mortiers hydrauliques, dans tous les cas. Toutefois, l'intervention de l'acide carbonique est aussi très-profitable à ces derniers, en ajoutant à l'intensité des phénomènes d'adhérence ; malheureusement, son accès dans l'intérieur s'opère très-lentement

et le plus souvent s'arrête à une petite profondeur au-dessous des surfaces ; tout dépend, d'ailleurs, de la nature du milieu dans lequel le mortier est placé.

51. — Les mortiers hydrauliques, arrivés après deux ou trois ans, sans intervention d'acide carbonique, à la dureté finale qui leur est propre (31), contiennent encore dans ce cas de la chaux soluble; il n'est en effet aucun d'eux, à quelque âge qu'on le prenne, qui, réduit en poudre fine et projeté dans une eau pure, ne la change en eau de chaux, à moins qu'il n'eût été intégralement pénétré par l'acide carbonique; le silicate double, gangue de tout mortier hydraulique, n'est donc pas une combinaison bien stable, à moins qu'on n'y considère comme libre la portion de chaux abandonnée dans cette circonstance.

SECONDE PARTIE.

XVI.

CHAUX LIMITES ET CIMENTS.

52. — Lorsque les calcaires argileux contiennent une proportion d'argile de plus de 20 pour cent, la cuisson au degré ordinaire ne les transforme généralement plus en chaux. Les produits que l'on obtient sont de deux sortes : les uns, placés sous l'eau au sortir du four ou peu de temps après, s'y maintiennent plusieurs jours et quelquefois plus d'un mois, sans donner aucun signe d'extinction, puis se délitent insensiblement sans manifester la moindre effervescence ; pulvérisés, au contraire, au sortir du four, et gâchés à la manière du plâtre, ces produits font d'abord une espèce de prise, puis se fendillent ou tombent en boue quand on les immerge.

Nous les avons nommés chaux limites, ou limites des chaux, parce que, en effet, la quantité d'argile qui les caractérise est la limite supérieure de celle qui constitue les chaux éminemment hydrauliques ; c'est, moyennement, entre 20 et 23 parties d'argile pour 100 de calcaire marneux que se trouvent ces produits bâtards, dont, au degré de cuisson ordinaire, on ne peut tirer aucun parti. Toutefois, les chiffres ci-dessus n'ont rien d'absolu ; nous avons rencontré des marnes compactes qui, de 21 à 22 de résidu laissé par elles dans l'acide chlorhydrique, pouvaient donner tantôt des ciments, tantôt des chaux éminemment hydrauliques, par une cuisson ordinaire ; mais ces résidus n'étaient pas, à beaucoup près, également composés en silice, alumine, magnésie et oxyde de fer ; ils pouvaient recéler, d'ailleurs, quoique en petite quantité,

des sulfates et des principes alcalins à doses différentes, toutes circonstances capables de produire les anomalies observées.

53. — Les produits de la seconde sorte, appelés ciments, renferment naturellement, et en proportions convenables, tous les principes qui les rendent capables d'un durcissement très-rapide, sans addition d'aucun autre ingrédient ; ils sont fournis par la cuisson complète des substances marneuses tenant généralement plus de 23 parties d'argile pour cent ; cette quantité peut aller jusqu'à 40, mais quand elle dépasse 30 pour 100, les ciments obtenus sont généralement médiocres ; dans tous les cas, leur qualité est subordonnée à la composition chimique de l'argile contenue et à l'intensité de la cuisson (63). Les proportions relatives de chaux caustique et d'argile dans les ciments peuvent être indiquées comme on l'a fait pour les chaux hydrauliques (13).

54. — Les calcaires à ciments se cuisent absolument comme les pierres à chaux, mais, étant plus sujets à se fritter, ils exigent plus de modération dans le feu et conséquemment moins de combustible ; ils ne s'éteignent ni ne font effervescence avec l'eau ; il faut les traiter comme le plâtre, c'est-à-dire les réduire en poudre aussi fine que possible et les gâcher avec une certaine quantité d'eau pour les mettre immédiatement en œuvre, attendu qu'ils font prise en quelques minutes, soit à l'air, soit à l'eau. Leur couleur est très-variable ; il y en a de brun foncé, de brun clair, de gris, de nankin, de jaune badigeon, etc. Leur énergie, soit pour la rapidité de la prise, soit pour la dureté finale, est aussi très-variable et dépend d'une foule de circonstances (62-65) dont il sera parlé plus tard.

On trouve des substances calcaires chargées en silice gélatineuse dans la proportion qui semble convenir aux ciments, et auxquelles aucun degré de cuisson ne peut donner cette qualité, c'est-à-dire la faculté d'une prise en même temps forte et prompte.

55. — On rencontre quelquefois des calcaires dont l'argile contient, outre la silice et l'alumine, une quantité de magnésie de 6 à 12 pour 100 ; la présence de cette base paraît exalter la qualité du ciment pour les travaux à la mer.

56. — Nous avons mis en regard, dans le tableau suivant, la composition de quelques ciments très-employés en France et en Angleterre ; on remar-

quera, comme un fait non indiqué dans les anciennes analyses, la présence de l'acide sulfurique dans la plupart d'entre eux; or, quand il y dépasse en quotité 4 à 5 centièmes, les ciments sont exposés à se fendiller après emploi et à tomber en ruine après quelques mois d'immersion. On peut remédier à ce grave inconvénient par une forte cuisson (1). Quelques-uns des ciments compris dans ce tableau sont capables, en l'état, d'atteindre une très-grande dureté; d'autres restent médiocres et d'autres se placent dans un rang moyen; nous aurions parfaitement le droit de désigner nominativement les uns et les autres, mais comme nous sommes bien convaincu que les plus faibles sont susceptibles de grandes améliorations par le seul effet d'une cuisson mieux appropriée à la composition particulière des calcaires marneux employés, nous nous abstiendrons, persuadé que les fabricants comprendront les motifs de notre réserve et s'efforceront de réaliser les perfectionnements qui manquent à leurs produits.

PRINCIPES COMPOSANTS, sur 100 parties.	d'Urrugue ou Guetary naturel.	Portland anglais artificiel.	Butte-Chaumont (Paris).	Boulogne dit Portland.	Vassy (Yonne).	Ciments de l'Isère.	Vitry-le-Français.	Médina. Parker nouveau.	Pouilly (Auxois).	Boulogne, ancien.	Cahors (Lot).
Chaux	63 44	62 05	62 040	61 75	39 50	38 077	35 70	43 45	49 600	49 283	44 45
Magnésie	1 11	traces	2 371	traces	traces	6 800	traces	13 95	» »	2 582	4 80
Matières inertes	» »	» »	» »	1 00	» »	» »	» »	» »	» »	4 300	» »
Silice	22 75	22 50	22 765	25 10	17 75	20 887	20 00	19 50	26 000	28 020	26 00
Alumine	8 75	6 50	8 251	7 25	6 80	8 000	9 77	5 60	10 000	9 575	12 15
Peroxyde de fer	3 75	3 85	4 570	4 50	7 35	3 436	4 33	12 05	5 100	5 726	5 50
Acide carbonique	» »	3 10	» »	» »	3 80	» »	4 00	2 50	7 230	» »	4 58
Eau	» »		» »	» »		» »	2 50			» »	
Principes alcalins	» »	0 80	» »	0 40	» »	» »	3 30	2 15	1 19	» »	1 20
Acide sulfurique	0 20	1 20	traces	» »	5 00	2 80	0 20	0 80	0 850	0 514	1 32
Rapport de l'argile à la chaux	0 31	0 46	0 35	0 52	0 41	0 65	0 53	0 90	0 72	0 84	0 96

57. — On parvient à fabriquer d'excellents ciments artificiels comme on fabrique des chaux hydrauliques, par des mélanges de substances crayeuses et argileuses ou de diverses marnes plus ou moins chargées en argile et en carbonate

(1) Il est probable qu'à une haute température il peut se dégager de l'acide sulfureux.

de chaux, mélanges que l'on soumet au degré de cuisson que l'expérience indique comme le plus favorable. Dans cette catégorie, comme dans celle des ciments naturels, on peut obtenir des produits qui, très-lents à la prise, atteignent ensuite assez rapidement une cohésion très-supérieure à celle des ciments correspondants à prise rapide; ce résultat est dû à un excès de cuisson (65) dont l'expérience seule peut indiquer le degré d'intensité (62 à 65).

Si l'on choisit, pour cette fabrication, des chaux et des argiles exemptes de fer, on obtient des ciments d'une grande blancheur et qui, sous ce rapport, peuvent convenir particulièrement à certains cas d'emploi.

XVII.

PRODUITS

QUE DONNENT EN GÉNÉRAL LES CALCAIRES ARGILEUX INCOMPLÉTEMENT CUITS.

58. — Lorsqu'une substance calcaire est imprégnée d'une quantité d'argile suffisante pour être transformée en chaux éminemment hydraulique, ou en chaux limite, ou en ciment, par une cuisson complète, on peut, par une cuisson incomplète, ne lui enlever qu'une partie de l'acide carbonique qu'elle contient, et obtenir ainsi divers produits n'ayant pas, à beaucoup près, les qualités que comporte la cuisson complète; c'est ainsi, par exemple, que tel calcaire argileux qui, par l'expulsion totale de son acide carbonique, donne une vraie chaux fusante, peut résister au contraire à toute tentative d'extinction, quand cette expulsion n'a pas dépassé certaines limites, mais acquiert en compensation d'autres propriétés que nous allons étudier.

59. — Si l'on pulvérise divers incuits de ce genre, provenant soit d'un même calcaire, soit de calcaires argileux différents, et qu'on les gâche à la manière du plâtre ou des ciments, on remarque une variété de résultats très-singulière : certaines de ces poudres, ainsi gâchées, font prise soit à l'air,

soit sous l'eau, en quelques minutes, exactement comme les vrais ciments; mais cette prise, tantôt persiste et fait des progrès, et tantôt rétrograde et se termine par une désagrégation complète.

La théorie, jusqu'à présent, n'a pu se rendre compte de ces singularités (j); divers incuits, appartenant à des calcaires argileux, comparés aux chaux complètes correspondantes, nous ont fourni le tableau suivant:

EXPLICATIONS.	CHAUX caustique.	Argile.	CHAUX restée à l'état de carbonate neutre.	TEMPS de la prise dans l'eau.
Calcaire A, complétement cuit, éteint en pâte . . .	100	30	00 00	6 jours.
Le même, contenant 20 p. % d'acide carbonique, employé comme ciment.	100	48	133 00	1 mois.
Le même, contenant 30 p. % d'acide carbonique, employé comme ciment.	100	97	448 00	15 minutes.
Calcaire C, complétement cuit, éteint en pâte . . .	100	37	00 00	8 jours.
Le même, contenant 12 1/2 p. % d'acide carbonique, employé comme ciment.	100	52	68 00	22 jours.
Le même, contenant 19 p. % d'acide carbonique, employé comme ciment	100	64	126 00	10 minutes.
Calcaire B, complétement cuit, éteint en pâte . . .	100	22	00 00	6 jours.
Le même, contenant 19 p. % d'acide carbonique, employé comme ciment.	100	37	127 00	N'a pas pris après 3 mois.
Calcaire E, complétement cuit, éteint en pâte . . .	100	13	00 00	12 jours.
Le même, contenant 28 p. % d'acide carbonique, employé comme ciment.	100	22	240 00	N'a pas pris après 3 mois.

Dans ce tableau, les incuits sont décomposés, par la pensée, en trois parties, savoir : 1° en chaux caustique, qui pourrait être mise à nu par le départ d'une partie de l'acide carbonique; 2° en argile; 3° et enfin en carbonate neutre que pourrait former l'acide carbonique non expulsé. Cette fiction, qui exclut toute idée de sous-carbonates basiques, nous a conduit à une règle empirique assez sûre pour distinguer *a priori* les incuits qui jouissent de la propriété des ciments, de ceux dont on ne peut tirer aucun parti : c'est de

(j) Nous avons traité spécialement cette question des incuits dans un Mémoire publié en 1840 sous le titre de *Recherches chimiques sur les calcaires argilifères imparfaitement cuits.*

considérer ces derniers comme correspondant aux rapports de l'argile à la chaux caustique, qui, à partir de 0,64 exclusivement, descendent à 0,63, 0,62, etc.; et les premiers, au contraire, comme correspondant aux rapports analogues, qui, à partir de 0,64 inclusivement, montent progressivement à 0,65, 0,66, etc. Cette loi serait peut-être susceptible de quelques modifications pour des calcaires marneux d'une composition exceptionnelle; il se pourrait, par exemple, que le point de départ 0,64, pour chaque progression, fût transporté à un autre terme de la série, mais c'est ce que nous ignorons.

60. — Il reste démontré, par ces expériences, que toute pierre susceptible d'être transformée en chaux éminemment hydraulique par une cuisson ordinaire complète, peut, par une cuisson incomplète, donner *un ciment* ou *un produit sans valeur*, selon la quantité d'acide carbonique qu'elle aura retenue; mais comme il sera toujours impossible en grand de maîtriser la cuisson de manière à laisser dans la pierre une quantité déterminée d'acide carbonique, il n'est pas probable que la pratique puisse jamais mettre à profit les observations précédentes.

61. — A quelque degré d'incomplète cuisson que parviennent les calcaires à chaux limites ou à ciments, ils ne donneront jamais un de ces produits sans valeur dont les calcaires à chaux hydrauliques offrent l'exemple; or, on remarque qu'à raison de la dose d'argile qu'ils contiennent, ils ne peuvent jamais, par une cuisson incomplète et selon la fiction adoptée, laisser moins de 64 parties d'argile en présence de 100 parties de chaux caustique, ce qui justifie la règle empirique posée ci-devant, en faisant observer, d'ailleurs, qu'on ne peut guère qualifier de véritables incuits que les calcaires argileux qui auraient conservé des 4/10 aux 8/10 de l'acide carbonique contenu dans leur partie carbonatée.

XVIII.

PRODUITS

QUE DONNENT LES PIERRES A CHAUX HYDRAULIQUES, A CHAUX LIMITES ET A CIMENTS, CUITES JUSQU'A RAMOLLISSEMENT ET FUSION PATEUSE.

62. — Tous les calcaires argileux sont susceptibles de ramollissement et de fusion pâteuse à une température très-élevée; les frittes ainsi produites paraissent, au premier abord, entièrement inertes; exposées pendant longtemps à l'air, quelques-unes résistent; d'autres subissent une désagrégation qui les réduit en une espèce de sable dont la valeur hydraulique n'a pas été étudiée.

Si l'on prend, au contraire, ces frittes au sortir du four ou peu de temps après, qu'on les pulvérise au même degré de finesse que les ciments, et qu'après les avoir gâchées à consistance de mortier, on les contienne dans des vases quelconques placés sous l'eau ou hermétiquement clos, on obtient des résultats très-divers, selon leur richesse en argile. Proviennent-elles de pierres à ciment, elles paraissent d'abord aussi inertes que le sable ordinaire; mais, après un mois ou deux, il s'opère entre les principes une réaction des plus remarquables; le durcissement commence et s'annonce par un changement de couleur, et la densité et la dureté de la masse finissent par arriver à un point que les meilleurs mortiers hydrauliques et les meilleures gangues à pouzzolanes (98) n'atteignent jamais, ou bien rarement.

63. — Si des calcaires à ciments nous passons aux calcaires à chaux éminemment hydrauliques ou à chaux limites, nous tombons, par les effets d'une cuisson poussée jusqu'à un terme voisin de la fritte, dans une telle diversité de résultats quant à la valeur des produits obtenus, qu'il est tout à fait impossible d'en débrouiller la loi; le ciment de Portland, par exemple (56),

dont l'indice n'est que de 0,46, passe pour devoir ses qualités à un excès de cuisson; or, nous connaissons des chaux qui, sous le même indice, cuites jusqu'au point où va commencer le ramollissement, n'en sont pas moins susceptibles d'extinction. Il serait trop long d'énumérer les nombreuses contradictions auxquelles donneraient lieu les rapprochements que l'on pourrait faire en ce sens. Si l'on considère maintenant combien peut varier en proportions respectives de silice, d'alumine, de magnésie, de fer oxydé à divers degrés, de principes acides ou alcalins, la composition d'une même quantité d'argile contenue dans un calcaire marneux, et par suite quelle variété de combinaisons peut produire une haute température entre la chaux et ces principes diversement dosés, on comprendra touté la difficulté d'en prévoir les résultats.

64.—Cette difficulté se complique encore par l'influence que doivent exercer la nature du combustible d'une part et le mode de cuisson de l'autre. Les houilles, les anthracites, les lignites, les tourbes, dégagent dans leur combustion des gaz (18) dont les principes n'existent pas dans le coke ou dans le bois; la cuisson au contact du combustible exerce une influence autre que celle de la chaleur transmise par longue flamme, etc.; il nous est arrivé, par l'effet de ces influences diverses, de tirer d'un même calcaire marneux, et à égale intensité de cuisson, des ciments excellents et des ciments très-médiocres; des ciments qui ne commençaient à devenir maniables qu'après plus d'un mois d'exposition à l'air, et d'autres qu'il fallait au contraire soustraire promptement à la même influence pour conserver leur énergie.

Si, à défaut de calcaires marneux naturellement constitués dans les proportions qui donnent des chaux éminemment hydrauliques, on en compose par des mélanges artificiels de marnes diverses, ou de chaux, de craies et d'argile, on peut, en poussant la cuisson de ces mélanges jusqu'à la fritte ou fusion pâteuse, obtenir des ciments dont la prise se fait attendre plusieurs heures, mais qui parviennent ensuite assez rapidement, sous l'eau ou sous sable frais, à une très-grande dureté. Leur emploi ne serait pas sans danger si le triage entre les fragments complétement frittés et ceux qui ne l'ont été qu'extérieurement, n'était pas exactement fait. Il reste, en effet, au centre de ces derniers, des parties susceptibles d'une extinction plus ou moins lente qui, venant à travailler et à pousser après emploi, causeraient la ruine des ouvrages.

65. — Nous avons dû conclure de toutes ces difficultés et singularités que la valeur comme pierre à ciment d'un calcaire marneux naturel ou composé ne peut être bien connue que lorsqu'on l'a essayé : 1° *à divers degrés de durée et d'intensité de cuisson ;* 2° *avec divers combustibles ;* 3° *et enfin à cuisson à longue flamme ou au contact du combustible.*

Il faut avoir apprécié aussi souvent que nous l'avons fait les énormes différences de qualité produites par la diversité de ces moyens de fabrication, pour y croire. Nous devons dire aussi que l'on se tromperait étrangement si l'on cherchait à conclure la valeur d'une pierre à ciment par analogie avec celle de toute autre pierre également chargée en argile, si d'ailleurs la composition de celle-ci, en silice et alumine, n'était pas identique de part et d'autre.

La cohésion acquise par les ciments après un mois ou deux n'est pas toujours une présomption certaine de supériorité ou d'infériorité pour leur avenir. On a remarqué, en effet, que quelques ciments riches en silice ont fini par surpasser de beaucoup d'autres ciments très-supérieurs dans les débuts, à raison d'une plus forte proportion d'alumine.

Il ne sera pas toujours possible de mettre en pratique les observations précédentes : il est malheureusement très-rare qu'on ait à choisir entre divers combustibles ; mais rien n'empêchera de régler l'intensité du feu, sa durée et la manière de l'appliquer à la pierre, en raison de ce que la nature de celle-ci exigera pour arriver comme ciment à son maximum d'énergie.

On sait, d'ailleurs, qu'à l'aide de la vapeur d'eau on fait produire de la flamme au combustible qui brûle naturellement sans en donner.

Les calcaires à ciment, réduits en scories par une forte chaleur, font feu au briquet ; la pulvérisation en est dispendieuse ; on ne les obtient, d'ailleurs, qu'avec un grand surcroît de combustible ; cependant, il peut se rencontrer des cas où, en présence des services qu'ils peuvent rendre par la grande dureté à laquelle ils arrivent, toute considération de dépense disparaisse. Ainsi, par exemple, si l'on voulait réparer ou construire à neuf un bajoyer ou un radier d'écluse, de telle sorte que la maçonnerie ou le béton ne formât qu'un tout monolithe capable de résister, après huit ou dix jours, comme une bonne maçonnerie hydraulique après dix mois, il faudrait employer en guise de mortier, avec du sable, l'un de ces ciments scorifiés constitués dans les pro-

portions des chaux limites, et dont la prise se fait en quelques heures (*k*). Ce serait encore à de pareils ciments qu'il faudrait s'adresser pour garnir par injection les parties affouillées sous des constructions quelconques, telles que murs de quai, piles de ponts, radiers d'écluses, etc.

XIX.

EMPLOI DES CIMENTS.

66. — Les ciments que l'on obtiendrait par défaut de cuisson ne se trouvent pas dans le commerce, à cause, probablement, des immenses difficultés de fabrication. Aussi n'entendons-nous parler ici que des ciments ordinaires plus ou moins fortement cuits; ceux-ci, à quelques exceptions près, s'éventent aussi facilement et peut-être plus facilement que le plâtre; il faut, pour les maintenir dans toute leur énergie, les tenir soigneusement à l'abri de l'air et de l'humidité; ils font prise en quelques minutes et quelquefois en quelques secondes quand ils sont bien vifs, et beaucoup plus lentement, quoique non éventés, après un certain temps d'embarillage. Cette lenteur devient nécessaire jusqu'à un certain point, pour la possibilité de l'emploi; on l'obtient au besoin, et en gagnant du temps, par l'étalage du ciment en couches peu épaisses, sous des hangars ouverts à tous les vents; quelques jours suffisent ordinairement.

Les ciments complétement éventés se chargent d'une quantité d'eau et d'acide carbonique proportionnée à la quantité de chaux qu'ils renferment; en cet état, ils ne font aucune prise, mais ils deviennent pouzzolanes, et, en cette qualité, sont capables de rendre de bons services.

67. — Les ciments peuvent servir à hydrauliser les chaux grasses, soit par

---

(*k*) Nous avons essayé un de ces ciments, façon de Portland, dont la ténacité par centimètre carré était de 9 kil. après cinq jours, et de 27 kil. après un mois d'immersion constante en eau douce.

une action lente, soit par une action rapide; dans le premier cas, on opère le mélange du ciment en poudre avec la chaux en bouillie, sans se préoccuper de la prise du ciment, qui est détruite par l'effet d'un gâchage nécessairement prolongé ; dans le second, on cherche à profiter de la vivacité du ciment, et, pour cela, on n'en opère le mélange qu'avec le mortier et au moment de l'emploi, en tenant préalablement celui-ci plus clair et moins chargé en chaux qu'à l'ordinaire. L'intention de ce procédé est facile à comprendre : c'est pour que le mélange et la mise en œuvre soient effectués en moins de temps que n'en met à faire prise le ciment lui-même. La qualité du mortier ainsi hydraulisé est proportionnelle à la dose de ciment introduite, laquelle dose dépend du degré de dureté qu'on a besoin d'atteindre.

68. — Les ciments s'emploient en rejointoiements, en restaurations d'édifices dégradés, en enduits de citernes, de bassins, de fosses d'aisances; en chappes de voûtes quelconques exposées à la pluie ; en dallages et carrelages, en moulage d'ornements architectoniques, etc., etc. On en fabrique aussi des tuyaux de conduite pour les eaux et les gaz d'éclairage ; ils rendent d'éminents services dans toutes sortes de travaux à la mer, là surtout où une prise instantanée est indispensable. Mais tous ne résistent pas indéfiniment à l'action saline; il y a des ciments particuliers pour ce cas d'emploi (110). Il n'est entré que du ciment dans la maçonnerie de briques du tunnel de la Tamise, à Londres; il est vrai de dire que, pour ce périlleux travail, le durcissement instantané était une condition expresse de succès. Il est question, en ce moment, de construire en béton à gangue de ciment des maisons monolithes, c'est-à-dire d'une seule pièce (*l*).

69. — En plein air, les jointoiements et les enduits extérieurs en ciment tiennent difficilement, à cause du retrait qui les fendille et les détache des parements. Tout ciment mis en œuvre contient en effet une quantité d'eau qui, après une dessication en apparence complète, peut s'élever encore de 16 à 20 pour 100. Cette eau latente n'est pas tellement fixée ou combinée, que le temps, et surtout les grandes chaleurs d'été, ne puissent en diminuer

(*l*) Il est certain que des maisons construites dans ce système ne pourraient que très-difficilement s'écrouler par les secousses ordinaires des tremblements de terre.

la quantité par évaporation ; de là, des gerçures profondes. L'intervention du sable est le seul moyen à opposer au retrait qui les produit, ainsi qu'aux effets destructeurs des gelées ; encore ne réussit-elle pas toujours.

L'introduction du sable dans le ciment diminue considérablement, dans les premiers temps, la cohésion dont ce dernier, employé seul, est susceptible, et cela d'abord par un défaut d'adhérence du sable à sa gangue, ensuite par la nécessité d'un surcroît dans la quantité d'eau introduite. La cohésion de ces agrégats, mesurée à une époque quelconque après leur confection, suit toujours la raison inverse du degré de liquidité donné au ciment dans l'acte du gâchage ; tout ciment qu'on est obligé d'amener à consistance de coulis clair n'atteint en effet que la moitié de la force que lui aurait donnée une consistance pâteuse ordinaire ; il reste d'ailleurs poreux, et son tissu est lâche et perméable. Nous ne connaissons aucun ciment qui fasse exception sous ce rapport, mais il en est chez lesquels l'affaiblissement dont il s'agit est moins prononcé que chez d'autres.

Comme les ciments s'emploient rarement purs, il faut, quand on a un choix à faire entre tels ou tels d'entre eux, les essayer toujours avec la dose de sable qu'ils sont destinés à recevoir dans l'emploi, car il arrive souvent que des ciments de provenances différentes, donnant, gâchés purs, des résultats à peu près équivalents, se comportent au contraire très-différemment par l'adjonction de part et d'autre d'une même quantité de sable. Nous en avons vu que la présence du sable affaiblissait au point de réduire leur ténacité à $1^{k}20$ par centimètre carré, après un mois d'immersion, tandis que, chez leurs équivalents employés purs, le sable, dans les mêmes circonstances, laissait encore à l'agrégat 3 ou 4 kil. de ténacité. On comprend quelle serait la déception pour le consommateur qui, n'ayant pas soupçonné cette fâcheuse influence du sable, aurait fait un choix par comparaison seulement entre les ciments gâchés purs.

Le tâtonnement conduit bien vite le praticien aux proportions respectives de sable, d'eau et de ciment les plus convenables à la nature du travail qu'il dirige, et l'habitude vient ensuite. Aucune règle n'est possible sur ce point, les dosages devant varier avec la qualité particulière de chaque ciment. Il est évident, d'ailleurs, qu'il faudra plus de sable à un ciment gras qu'à un ciment maigre. Nous ferons remarquer que la présence d'une trop forte quantité de sable d'un côté et un excès d'eau de l'autre produiraient un agrégat peu con-

venable aux revêtements ou maçonneries pleines destinées à empêcher les infiltrations, et généralement toute fuite de substances liquides.

70. — Les ciments n'offrent, généralement, des garanties de durée bien certaines que sous l'eau, ou sous une terre fraîche, ou enfin dans des lieux constamment humides; à cette condition, ils arrivent en quelques mois à une dureté que les meilleurs mortiers hydrauliques n'atteignent dans les mêmes circonstances qu'après un an ou dix-huit mois. Si l'on avait besoin d'une dureté exceptionnelle comparable à celle du calcaire compacte, il faudrait la demander, selon ce que nous avons dit (62), à certains ciments peu chargés en argile et cuits jusqu'à scorification. Mais si les causes de destruction devaient agir immédiatement, les ciments de ce genre n'y résisteraient pas; il faudrait alors trouver le moyen de les protéger provisoirement par d'autres ciments à prise rapide, car la leur se fait attendre (64) trop longtemps pour les cas où une certaine dureté est immédiatement nécessaire.

71. — Nous avons dit (66) que les ciments complétement éventés ne font aucune prise employés seuls; mais tout change dès qu'on leur adjoint une chaux grasse, car non-seulement alors ils se prêtent à tout le temps dont on a besoin pour l'emploi, mais ils exercent sur cette chaux un pouvoir hydraulisant très-supérieur à ce qu'on obtient d'eux à l'état vif. C'est donc là un nouveau moyen de convertir les chaux grasses en chaux hydrauliques; dans ce cas, et selon le degré d'énergie que l'on veut atteindre, on peut à 100 parties de chaux ajouter de 100 à 200 parties de ciment (*m*). Mais si l'on considère le ciment éventé comme une pouzzolane et qu'on veuille l'employer dans cette hypothèse, il suffit de lui adjoindre de 10 à 30 parties de chaux caustique pour 100, selon que l'on veut obtenir une prise plus ou moins rapide sous l'eau.

72. — En étudiant attentivement les ciments, non-seulement par rapport aux diverses formations géologiques d'où ils proviennent, mais même par rapport aux divers groupes d'une même formation, on y découvre des carac-

---

(*m*) *Annales des ponts et chaussées* des mois de mars et avril 1851.

tères particuliers et des singularités dont l'explication ne paraît pas facile. Les uns, de verdâtres qu'ils étaient en poudre, deviennent, après emploi et sous l'influence d'un milieu humide, d'une parfaite blancheur intérieurement; d'autres restent jaunâtres ou gris bleuâtre; il en est dont la cohésion, après vingt-quatre heures de gâchage, est plus forte qu'après quinze jours, et reprend ensuite la marche progressive commune à tout ciment. Une autre singularité consiste en ce que le durcissement sous l'eau commence, chez quelques ciments gâchés purs ou avec sable, par le centre des masses, en progressant vers les surfaces, tandis que chez d'autres, il suit la marche contraire; il serait donc très-facile de se tromper sur la vraie qualité d'un ciment, si on le jugeait par sa dureté superficielle après un mois ou deux d'immersion : tel ciment que, dans ce cas, l'ongle entame facilement sur sa surface, peut valoir beaucoup plus que celui qui résiste, etc., etc. Le fer joue, dans ces phénomènes de coloration et de cohésion, un rôle malheureusement plus nuisible qu'utile.

Voici un exemple de retrait bon à citer pour l'emploi des ciments en lignes continues, comme dans le cas des tuyaux de conduite moulés sur place par parties soudées bout à bout. Dans ce cas, la continuité, après un jour ou deux, s'interrompt spontanément par des fissures perpendiculaires à l'axe de direction, et divise la ligne en parties variables en longueur de 8 à 12 mètres; en régularisant ces longueurs au moyen de sections de moindre résistance ménagées de dix en dix mètres par des évidements pratiqués circulairement autour des tuyaux, on arrive à mesurer le retrait assez exactement; il a été trouvé de 0^m0001 par mètre, soit d'un millimètre pour dix mètres, dans le cas d'un ciment mêlé de cailloux et de sable, à consistance coulante de moulage.

Ce coefficient de contraction ne peut pas convenir à tous les ciments; il doit varier, d'ailleurs, avec la dose de sable et de cailloux introduite; mais, quel qu'il soit, il n'est pas un obstacle à la construction en ligne continue d'une conduite d'eau, puisqu'il est toujours possible de rétablir la continuité par des bourrelets en ciment pratiqués autour des fissures quand le travail de retrait a cessé, ce qui arrive après quelques jours.

TROISIÈME PARTIE.

XX.

PRODUITS NATURELS

QUI PEUVENT SE COMBINER IMMÉDIATEMENT AVEC LA CHAUX.

73. — Nous plaçons en première ligne les produits volcaniques connus sous le nom de *pouzzolanes*, parce qu'ils furent exploités d'abord aux environs de Pouzzoles, petite ville du royaume de Naples, par les colonies grecques venues d'Eubée, et plus tard par les Romains. Ce sont des laves ou déjections volcaniques plus ou moins anciennes, modifiées par l'action du temps, et composées essentiellement de silice, d'alumine et de peroxyde de fer, auxquels s'unissent accidentellement la magnésie, la chaux, la potasse, la soude et probablement d'autres principes, en quantités à peine pondérables. Les pouzzolanes se trouvent toujours sur les flancs ou dans le voisinage des volcans allumés ou éteints ; les catacombes de Rome sont creusées dans des massifs de pouzzolane ; les anciens volcans de l'Auvergne et du Vivarais en fournissent, mais de qualités très-médiocres.

Voici la composition de celles qui sont les plus connues :

DÉSIGNATION DES POUZZOLANES.	Sable mixte.	Silice.	Alumine.	Magnésie.	Peroxyde de fer.	Chaux.	Eau.	Principes alcalins et volatils.
Traass des bords du Rhin........	8 73	46 23	20 71	1 00	5 48	2 15	9 23	6 30
Pouzzolane de Rome.............	5 00	47 66	14 33	3 86	10 33	7 66	7 03	4 13
— du Vésuve, brune.....	20 00	24 50	15 75	traces	16 30	8 96	3 50	11 00
— gris foncé...........	1 50	44 50	16 50	3 00	15 50	10 00	5 00	4 00
— gris clair.............	2 50	42 00	15 50	4 40	12 50	9 50	33 33	10 27
— du Vivarais, grise.....	3 95	35 09	17 65	3 17	16 82	4 26	19 06	» »
— de l'Hérault, brune...	4 50	38 50	18 35	» »	14 90	8 70	7 73	7 30
— de l'Ile Bourbon, brune	1 00	25 67	16 33	traces	40 00	» »	17 00	» »
— du Vivarais, brune...	7 48	30 73	11 63	2 49	24 92	3 73	19 02	» »

La potasse et la soude, s'il s'en trouve dans les pouzzolanes du Vivarais, sont comprises sous les chiffres *eau*, de l'avant-dernière colonne; la plupart de ces pouzzolanes diffèrent peu, comme on le voit, des argiles communes cuites; quelques-unes sont hydratées, et font pâte avec l'eau comme les argiles crues, avec lesquelles on pourrait les confondre au premier aperçu, sans la différence de leur origine et la présence, d'un côté, de quelques éléments volcaniques qui les séparent minéralogiquement.

SABLES JOUISSANT DE QUELQUES PROPRIÉTÉS POUZZOLANIQUES.

74. — Ces sables sont abondants aux environs de Brest et sur d'autres points de la Basse-Bretagne; ils proviennent de la décomposition spontanée des gneiss granitiques; le feldspath y passe à l'état de kaolin. Tels quels, ces sables manifestent quelques propriétés pouzzolaniques qu'une légère torréfaction au four à réverbère accroît considérablement; en ce dernier état, nous les avons trouvés composés comme il suit:

Silice	60 33	100 00
Alumine	21 43	
Peroxyde de fer	8 57	
Chaux et magnésie	6 69	
Principes solubles	2 75	

Il reste dans ces sables torréfiés une assez grande quantité de paillettes de mica qui jouent un rôle tout à fait passif. Ils ont été employés dans les travaux hydrauliques du port de Brest.

ROCHES AMPHIBOLIQUES, OU DIORITES DÉCOMPOSÉS.

75. — Ces roches, que M. Avril, inspecteur général des ponts et chaussées, a fait connaître en 1824, comme jouissant naturellement de certaines propriétés pouzzolaniques, ont l'apparence d'argiles rousses ou d'un blanc sale à texture grossière, conservant toutefois l'aspect métamorphique qui décèle leur origine; on les trouve assez abondamment aux environs de Châteaulin et de Saint-Servan, et en d'autres points de la Basse-Bretagne. Une cuisson

modérée leur donne une énergie incomparablement plus grande qu'à l'état cru. Elles ont été employées avec succès pour divers travaux d'art du canal de Nantes à Brest. Voici leur composition après cuisson :

	DES ENVIRONS DE SAINT-SERVAN. VARIÉTÉS		DES ENVIRONS DE CHATEAULIN. VARIÉTÉ
	rousse.	blanc sale.	rouge de brique, pâle.
Sable noir très-fin	10 50	10 50	» »
Silice	42 10	38 50	60 30
Alumine	23 65	29 40	23 70
Magnésie	» »	» »	2 50
Peroxyde de fer	22 47	18 10	10 30
Chaux	traces	2 00	traces
Pertes et alcalis	1 28	1 50	3 20
	100 00	100 00	100 00

ROCHES SILICIFÈRES.

76. — Sous ce nom, nous entendons parler de certaines roches tenant la silice à l'état gélatineux ou semi-gélatineux ; c'est ainsi que l'on trouve à la base de la formation crayeuse, au-dessus des argiles du gault, une roche très-tendre, légère, grisâtre, devenant verdâtre par l'humidité, et qui, à raison de la grande quantité de silice gélatineuse qu'elle contient, se comporte comme une pouzzolane, mais de médiocre qualité, et que la cuisson n'améliore pas sensiblement. Cette roche est connue dans le pays sous le nom de gaize, ou pierre morte ; en voici la composition donnée par M. Sauvage, ingénieur des mines, qui le premier l'a fait connaître :

Eau	8 00
Silice soluble dans la potasse liquide	56 00
Sable chlorité très-fin	12 00
Argile	7 00
Sable quartzeux	17 00
	100 00

CRAIES A SILICE GÉLATINEUSE.

77. — Ces calcaires se trouvent parfois dans l'étage moyen des dépôts tertiaires, mais surtout dans la formation crétacée elle-même. Lorsque la silice y entre en proportions de 30 à 40 pour 100, ils fournissent, par la pulvérisation, une matière qui se comporte avec la chaux grasse comme la plupart des pouzzolanes, mais qui ne peut être employée que dans certaines circonstances, hors du contact de l'eau et de l'air; c'est aussi le cas de la gaize et généralement de tous les silicates formés par voie humide avec la chaux grasse et la silice sous forme gélatineuse. Ces silicates durcissent d'abord très-vite et très-bien dans l'eau, et présentent les plus belles apparences pour l'avenir; mais après quelques mois, leurs surfaces deviennent molles et savonneuses; en plein air, cette détérioration se manifeste par des espèces d'efflorescences; il est probable que la grande affinité de l'acide carbonique pour la chaux met la silice à nu, ce qui expliquerait très-naturellement le phénomène.

SABLES ARGILEUX, OU ARÈNES.

78. — On a donné le nom d'arène à un sable quartzeux, à grains inégaux, entremêlé d'argile brune ou jaune orangé, en proportions variables du 1/4 aux 3/4 du volume total. Les arènes occupent toujours les sommets arrondis de certaines collines ou mamelons d'une faible élévation; elles en forment quelquefois la masse principale; elles appartiennent à l'époque diluvienne des dépôts tertiaires; ce qu'elles ont d'exceptionnel et de très-caractéristique, comparées aux sables argileux ou limoneux ordinaires, c'est une certaine propriété pouzzolanique, indépendante de toute cuisson, et qui réside évidemment dans la partie argileuse seule; disons, toutefois, que cette propriété n'est pas commune à toutes les arènes, et que celles qui en jouissent ne la possèdent qu'à un degré très-médiocre, comparativement à ce qu'elle devient par l'effet d'une cuisson modérée.

Voici la composition de la gangue d'une des meilleures arènes connues;

elle provient des environs de Saint-Astier, entre Périgueux et Mucidan, dans le département de la Dordogne :

PARTIE ARGILEUSE, OU GANGUE.

Quartz ou sable	4 13	99 67
Silice	38 54	
Alumine	20 00	
Peroxyde de fer	12 00	
Carbonate de chaux	8 00	
Eau	17 00	

XXI.

PRODUITS ARTIFICIELS

SUSCEPTIBLES DE COMBINAISON AVEC LA CHAUX GRASSE PAR VOIE HUMIDE.

79. — Ces produits résultent de la cuisson des argiles, et comme ils ont la plus grande analogie avec les pouzzolanes naturelles, on les désigne sous le nom de *pouzzolanes artificielles.*

Les argiles se distinguent des autres terres et des roches molles par la facilité avec laquelle elles se délaient dans l'eau et y forment cette bouillie qui, ramenée à une certaine consistance, prend de l'onctuosité et une sorte de ténacité, en se laissant allonger et pétrir en tous sens, sans se briser. Cette pâte, desséchée, devient solide et résistante.

Les argiles sont répandues sur le globe avec une espèce de profusion ; il est peu de cantons d'une certaine étendue où l'on n'en trouve ; leur mode de gisement varie selon la différence des terrains ; plus rares que partout ailleurs dans les formations primordiales, elles ne s'y montrent guère qu'à l'état de kaolin ou terre à porcelaine ; disposées en collines arrondies dans le passage de ces formations aux terrains secondaires, et fréquemment aussi au milieu des grandes vallées, leur présence s'annonce par une désespérante aridité.

Dans les terrains secondaires plus modernes que les précédents, et surtout dans les terrains de transport, les argiles sont rarement à la surface; elles se présentent par bancs ou couches horizontales très-étendues, et ordinairement recouvertes de sable, de calcaire grossier ou de silex meulière; quelquefois, ces couches sont interrompues et disposées sous forme d'amas irréguliers, isolés, mais peu distants les uns des autres.

80. — Les argiles sont essentiellement composées de silice, d'alumine et d'eau; elles forment un nombre presque infini de variétés, différenciées, soit par les proportions, soit par la présence accidentelle, en quantités très-inégales, d'oxyde de fer ou de manganèse, de carbonate de chaux ou de magnésie, de fer sulfuré, de sables divers, de débris végétaux, etc. L'argile chimique ne contient absolument que de la silice, de l'alumine et de l'eau, combinées en proportions atomiques variables; elle est blanche, opaque, douce et savonneuse au toucher; c'est un hydro-silicate d'alumine; les terres dites de pipe sont des argiles pures.

Les argiles impures paraissent grises, rousses, jaunes, brunes ou noirâtres, selon la nature des principes qui contribuent à leur altération; elles sont alors plus ou moins fines et plus ou moins plastiques; quand leur impureté dépasse certaines limites, elles rentrent dans la classe des terres fortes, bonnes, jusqu'à un certain point, pour la fabrication des briques ou tuiles, mais trop grossières pour les poteries.

L'argile pure n'est pas sensiblement attaquée par les acides faibles, mais les acides sulfurique, azotique et chlorhydrique bouillants dissolvent une partie de son alumine; après cette attaque, la potasse liquide chauffée peut dissoudre la quantité de silice qui excède la composition primitive atomique du silicate, et y ramener le résidu.

81. — Les argiles soumises à divers degrés de cuisson, compris entre le rouge un peu plus que sombre marquant environ 600° et la chaleur extrême qui fritte celles qui sont fusibles et ramollit légèrement celles qui ne le sont pas, éprouvent dans leur constitution des changements physiques et chimiques très-prononcés; physiquement, elles durcissent et perdent la faculté de faire pâte avec l'eau; elles l'absorbent avec une grande avidité lorsqu'elles n'ont

pas subi la fusion pâteuse; chimiquement, elles deviennent, selon l'intensité du coup de feu, plus ou moins accessibles aux agents chimiques qu'auparavant; elles peuvent devenir tout à fait inattaquables aux acides, après avoir subi la température rouge blanc à laquelle on soude le fer.

82. — Quand on est parvenu à modifier par la cuisson une argile quelconque, de manière à la rendre au plus haut point accessible aux agents chimiques, elle acquiert au plus haut point aussi la propriété de se combiner intimement avec la chaux et de former par là des pâtes qui durcissent progressivement dans l'eau et dans les lieux humides; et comme cette même propriété appartient particulièrement aux pouzzolanes naturelles (73), on a donné aux argiles dans lesquelles le feu l'a développée le nom de *pouzzolanes artificielles*.

Nous avons dit (80) qu'à l'état naturel les argiles sont des combinaisons hydratées de silice et d'alumine; or, il est très-remarquable que le degré de cuisson qui les transforme en pouzzolanes au maximum de puissance hydraulique, soit en même temps celui qui suffit à la vaporisation des dernières parties d'eau combinées, de sorte que la condition de bonne cuisson puisse s'énoncer de deux manières, savoir : 1° *régler la durée et l'intensité du feu de manière à rendre les argiles attaquables au plus haut point par les acides et les alcalis;* 2° *régler cette durée et cette intensité de manière à dégager les dernières parties d'eau des argiles sans dépasser* 600° *à* 700° *thermométriques ;* ces deux énoncés expriment une même condition en termes différents; le premier réalise l'autre, et réciproquement. L'argile subit alors un degré d'incandescence un peu supérieur au rouge sombre, et devient indélayable dans l'eau; c'est cette cuisson que nous avons appelée *normale* dans nos précédentes publications.

83. — La cuisson normale convient à toutes les argiles exemptes de carbonate de chaux; mais, quand elles en contiennent plus de 15 à 20 pour 100, il faut, pour développer au plus haut degré leur propriété pouzzolanique, décomposer le carbonate, et opérer par là la combinaison de la chaux avec l'argile, mais sans dépasser 700 ou 800 degrés thermométriques; conséquemment, il faut suppléer à l'intensité du feu par la durée, qui doit excéder celle

qui suffit à la cuisson normale. Comprise de cette manière, la cuisson des argiles marneuses prend le nom de *supra-normale*.

84. — Les argiles étant peu conductrices de la chaleur, il devient, à leur égard, très-difficile de réaliser les prescriptions précédentes, lorsqu'on les soumet à l'action du feu sous forme de briques ou de fragments irréguliers; il arrive alors que les parties intérieures sont trop peu cuites quand l'extérieur l'est assez, ou que l'extérieur l'est trop quand l'intérieur l'est assez, et ces différences sont d'autant plus sensibles, que les briques ou fragments ont un plus fort volume. On ne peut donc, en procédant par les méthodes ordinaires de cuisson, que rester fort au-dessous des conditions de perfection indiquées ci-dessus; il n'y a d'ailleurs dans les fours ordinaires, soit à longue flamme, soit à feu continu (12), ni uniformité dans la répartition de la chaleur, ni constance dans son intensité; cependant, la plupart des pouzzolanes artificielles employées jusqu'à ce jour n'ont été cuites que de cette manière; mais avec des précautions dans le dosage du combustible, on est parvenu à en confectionner de passables.

Les changements d'aspect que subissent les argiles inégalement cuites peuvent servir à faire apprécier approximativement le degré pyrométrique par lequel elles ont passé, par comparaison avec ce qui s'observe dans les briqueteries. Une forte cuisson ramollit les briques, les déforme en les couvrant d'une sorte de vernis; une bonne cuisson leur donne la dureté et la sonorité désirées dans le commerce, tandis que la faible cuisson, qui convient aux qualités pouzzolaniques, les fait rejeter comme trop tendres, trop sujettes à se dégrader par l'effet des intempéries; ces divers états peuvent correspondre, d'ailleurs, à des degrés pyrométriques très-différents, selon que les argiles sont plus ou moins réfractaires, plus ou moins fusibles; toujours est-il qu'une argile scorifiée ne vaut rien comme pouzzolane, et qu'à ce degré de cuisson qui convient à la bonne qualité de la brique, ses propriétés pouzzolaniques sont très-médiocres.

Pour remédier à toutes ces difficultés, il deviendrait indispensable de réduire les argiles en poudre après les avoir desséchées, et de les cuire sous cette forme en restant constamment maître de l'intensité et de la durée du feu, et de l'uniformité de son action sur toutes les parties pulvérulentes; on y parvient

facilement, sur une petite échelle, en brassant la poudre dans des creusets de Hesse d'une faible capacité, chauffés au rouge, ou en l'étendant sur des plaques de fonte incandescentes; mais ces moyens de laboratoire ne sont pas proposables pour une fabrication en grand.

Nous avons exposé dans nos études spéciales, publiées en 1846, la description d'un système de cuisson qui nous paraissait pouvoir résoudre le problème; mais l'industrie n'a donné aucune suite à cette conception; elle a été arrêtée probablement par des difficultés que nous n'avions pas suffisamment prévues, à savoir le soulèvement des poussières produit par leur contact subit avec des parois incandescentes, soulèvement qui les projette au loin avec une telle violence, qu'il s'en perd près des 4/5. Ce grave inconvénient exigerait une gradation bien ménagée dans l'application de la chaleur, problème dont la solution n'a rien d'impossible, si l'on veut sérieusement s'en occuper.

85. — La cuisson en vase clos, si elle était praticable, n'aboutirait pas à un résultat favorable, elle ferait perdre aux pouzzolanes ainsi obtenues la plupart de leurs qualités; rendrait leur combinaison avec la chaux lente à la prise sous l'eau, et sujette à se détériorer, en commençant par les surfaces, après quelques mois d'immersion; la balance, cependant, n'indique aucune différence de poids entre deux quantités égales d'une même argile, cuites l'une au contact de l'air, l'autre en vase clos; mais le contact de l'air donne lieu à des modifications moléculaires qu'on n'observe pas dans l'autre cas; il produit chez les argiles, selon la quantité de fer qu'elles contiennent, des couleurs rosées ou rouge brun très-vives, et les rend facilement attaquables par les acides; en vase clos, au contraire, les poudres cuites restent ternes ou d'un gris sale, et n'abandonnent que très-peu d'alumine aux acides bouillants.

86. — Le tableau suivant donnera une idée de l'influence de la composition des argiles sur la qualité des pouzzolanes qu'elles peuvent fournir, relativement au mode de cuisson qui leur convient.

COMPOSITION DES ARGILES.	A	B	C	D	E	F	G	H
Silice	70 00	64 00	53 00	46 00	59 00	30 00	28 00	19 00
Alumine	20 00	24 00	30 00	38 00	19 00	20 00	11 00	10 00
Peroxyde de fer	» »	» »	» »	» »	10 00	2 00	4 00	8 00
Carbonate de chaux	» »	» »	» »	» »	» »	38 00	40 00	16 00
Carbonate de magnésie	» »	» »	» »	» »	» »	» »	» »	10 00
Sable ou quartz divisé	» »	» »	» »	» »	» »	» »	13 00	25 00
Eau	10 00	12 00	17 00	16 00	12 00	10 00	14 00	12 00
Mode de cuisson à appliquer	normale	normale	normale	normale	normale	supra normale	supra normale	supra normale
Valeur relative des pouzzolanes	100	96	80	77	70	65	46	44
Désignation vulgaire des argiles	Terres de pipe ou argiles réfractaires.				Argile ocreuse.	Argile marneuse.	Terres à briques.	

On voit, par ce tableau, que la valeur pouzzolanique d'une argile dépend de son degré de pureté et de sa richesse en silice. Les trois premiers répondent, à très-peu près, aux silicates de 4, de 3 et de 2 parties de silice pour 1 partie d'alumine, en proportions atomiques.

XXII.

CONFECTION DES SILICATES A CHAUX ET POUZZOLANES.

87. — Nous arrivons à une classe de composés qui n'a aucune ressemblance avec les agrégats appelés mortiers; ici, en effet, la pouzzolane et la chaux se confondent dans l'union intime d'une combinaison (comme on l'entend en chimie) en un seul tout homogène, où la chaux n'est plus une simple gangue enveloppant et collant ensemble des grains durs qui conservent individuellement leur forme et leur volume; elle disparaît, au contraire, dans les liens intimes des affinités, de telle sorte que, lorsque l'on casse un composé de ce

genre, convenablement confectionné, et ayant durci sous l'eau ou dans un lieu humide, on n'aperçoit dans sa texture rien qui puisse faire distinguer, les uns des autres, ses éléments constitutifs.

Il est rare que ces silicates doubles d'alumine et de chaux soient employés seuls; l'économie et d'autres raisons (92) obligent le plus souvent à y introduire du sable et des cailloux; ils fonctionnent, alors, comme gangues d'agrégats; c'est pourquoi nous substituerons à leur dénomination scientifique celle de *gangues à pouzzolanes*, ou *pouzzolaniques*.

Le durcissement de ces gangues étant le résultat d'un travail moléculaire intime, il s'ensuit que les proportions de chaux qui conviennent au maximum de la cohésion produite par ce travail devraient être aussi variées que la composition des pouzzolanes elles-mêmes, d'où il résulterait qu'aucune règle ne serait possible en fait de dosage; mais il arrive, fort heureusement, qu'à d'assez grandes différences dans les proportions de chaux répondent des différences de cohésion qui le sont beaucoup moins, ce qui diminue beaucoup aussi l'importance que l'on pourrait attacher à une exactitude tout à fait scientifique, surtout quand les gangues n'ont à fonctionner qu'en eau douce, car l'eau de mer comporte d'autres obligations. Des nécessités de main-d'œuvre forceraient d'ailleurs à s'écarter de l'exactitude chimique, si, pour y obéir, il fallait employer une quantité de chaux trop faible pour opérer cette première liaison pâteuse, toute physique, sans laquelle le maniement d'une gangue serait dans la plupart des cas impossible.

88.— Pour savoir au juste ce qu'on emploie de chaux vive et de pouzzolane dans la confection d'une gangue, il est indispensable de doser ces matières au poids, sauf à traduire ensuite ces poids en volumes, pour la facilité des dosages pratiques. L'expérience a montré que, dans les travaux en eau douce, 18 kil. de chaux grasse sont une assez bonne proportion pour 100 kil. d'une pouzzolane qui serait composée, moyennement, de 64 parties de silice et de 36 parties d'alumine; en partant de là, on peut, à très-peu près, modifier la quantité de chaux additive, quand on tombe sur une pouzzolane mêlée naturellement de matières inertes, telles que sables, oxydes de fer, carbonate de chaux, etc. On peut descendre alors à 15 ou même à 12 parties de chaux caustique pour 100 de pouzzolane, selon son degré de pauvreté en principes actifs, silice, alumine et magnésie.

On jugera, d'ailleurs, des écarts que l'on peut se permettre en fait de dosage, en considérant que deux ou trois kilogrammes de chaux, en plus ou en moins, de la proportion supposée la meilleure pour 100 kilog. d'une pouzzolane ordinaire, ne peuvent guère donner lieu qu'à une perte de 6 à 7 pour 100 de la cohésion *maxima* dont la combinaison est capable.

89. — Il n'en est plus de même, quand, au lieu d'une chaux grasse, on emploie une chaux hydraulique; le dosage, alors, dépend tellement de l'énergie de la chaux d'une part, et de celle de la pouzzolane de l'autre, qu'il est impossible de dire autre chose sur ce point, sinon qu'il vaut infiniment mieux pécher par excès que par défaut de chaux, et que la moindre quantité qu'on en puisse employer, pour 100 parties de pouzzolane, doit être le double de la dose de chaux grasse convenable dans la même circonstance. Il y aurait de 40 à 70 pour 100 à perdre en cohésion en se tenant au-dessous de cette limite.

L'expérience prouve d'ailleurs que, nonobstant le meilleur dosage, on n'arrive jamais, en combinant une excellente pouzzolane avec une excellente chaux hydraulique, à un aussi bon résultat que par l'emploi d'une chaux grasse, de sorte qu'à moins de travaux à la mer ou de bétonnements en eau douce, exposés à être délavés faute d'une prise assez rapide, il n'y a aucun avantage, et sous aucun rapport, à composer des gangues avec des pouzzolanes de bonne qualité et des chaux hydrauliques.

90. — La cohésion de toute gangue à pouzzolane, quelle qu'en soit la chaux, étant le résultat d'une combinaison, il est évident qu'elle sera puissamment favorisée : 1° par la division physique des parties, poussée mécaniquement aussi loin que possible; 2° par le rapprochement de ces parties, suite d'une bonne manipulation; 3° et enfin, par la présence continuelle de l'humidité, sans laquelle les affinités ne pourraient agir.

Conséquemment, la chaux éteinte par le procédé ordinaire sera préférable à la chaux éteinte en poudre (20), et la pouzzolane en poudre impalpable, à la pouzzolane à l'état de sable. On se fera une idée de l'influence du degré de finesse des pouzzolanes par les faits suivants, savoir que les cohésions finales

des gangues répondent à 90, ou à 60, ou à 40, selon que cette finesse répond elle-même à celle d'une poudre impalpable, ou du gros sable, ou de la poudre à canon.

XXIII.

EMPLOI DES GANGUES A POUZZOLANES.

91. — La destination la plus habituelle de ces gangues est de lier la blocaille dont se composent les bétons; ceux-ci se confectionnent, ni plus ni moins, comme leurs analogues à gangues de mortier hydraulique ; mais il y a entre ces deux sortes d'agrégats des différences de résistance qu'il est indispensable de faire connaître pour que l'on puisse en régler judicieusement l'emploi.

Au terme de sa cohésion finale, le mortier hydraulique adhère au moellon dans les maçonneries et à la blocaille dans les bétons, avec une force au moins égale à celle qui lie ses propres parties; il n'en est pas ainsi des gangues à pouzzolanes : leur propre cohésion est toujours supérieure à leur faculté d'adhérence, d'où il suit que, pour mettre à profit toute leur valeur comme corps résistants, il faudrait les employer seules avec la chaux; elles auraient alors, mais seulement pour le cas d'immersion ou de séjour en lieu constamment humide, une supériorité marquée sur le simple mortier hydraulique, tant pour la vitesse de prise que pour le progrès ultérieur du durcissement; mais dès que l'on interrompt la continuité du tissu d'une telle gangue par l'introduction d'une certaine quantité de corps durs, tels que sables, graviers, cailloux ou rocaille, on ne doit plus attendre de l'agrégat, considéré dans sa masse, la même force, la même faculté de résister à des chocs ou tiraillements, que de la gangue prise isolément.

C'est ainsi, par exemple, que la cohésion d'une gangue tenant 2 volumes de pouzzolane d'Italie et 1 volume de chaux grasse en pâte, étant représentée par 100, après deux ans d'immersion, ne le sera plus que par 68 pour 2

volumes de la même pouzzolane avec 1 volume de sable et 1 volume 1/2 de chaux en pâte ; ce chiffre descendra à 32 si la pouzzolane et le sable interviennent en quantités égales dans 1 volume de chaux en pâte ; or, dans les mêmes circonstances, la cohésion d'un bon mortier à chaux hydraulique sera représentée par 70.

Il faut donc bien se pénétrer de cette vérité, qu'à part une prise plus rapide, toute gangue à pouzzolane, chaux et sable, devient inférieure en cohésion à un mortier à chaux éminemment hydraulique dans le cas d'une immersion continue, et à plus forte raison en plein air, à toutes les intempéries, où rien ne peut remplacer ce dernier.

92. — Les gangues pouzzolaniques sans mélange de corps durs, et qui, sous l'influence d'une humidité constante, tendraient plutôt à se gonfler qu'à diminuer de volume, se comportent au contraire comme les pâtes à retrait sous l'influence permanente d'une dessication naturelle. Cette dessication s'oppose en outre au jeu des affinités, et rend la combinaison impossible ; de là, l'insuffisance et la grande médiocrité de ces gangues dans toutes les constructions exposées à un air sec ; elles y restent friables, pulvérulentes, et sujettes aux gelées, à moins d'une forte dose de sable qui peut bien les défendre du retrait, mais non de la pulvérulence.

Toutes ces raisons démontrent surabondamment que les gangues pouzzolaniques ne conviennent qu'aux travaux constamment immergés, ou tellement placés que l'influence périodique d'un air sec ne puisse durer assez pour enlever aux massifs l'humidité qui les protége contre les fendillements et la pulvérulence ; ces gangues contiennent en effet, indépendamment de leur eau combinée, d'autres quantités d'eau évaporables à l'air et qui peuvent s'élever de 0,22 à 0,28 par unité de masse, à quoi ajoutant celle qui n'est pas évaporable et qui varie de 0,16 à 0,20, on arrive au chiffre énorme de 0,38 à 0,48 pour la quantité d'eau totale contenue dans cette classe d'hydrosilicates, d'ailleurs sujets à la gelée. Mais à l'abri de ces causes de destruction, les gangues pouzzolaniques peuvent rendre de grands services et prévaloir, selon les circonstances, sur les mortiers hydrauliques.

93. — Nous avons dit un mot (77) des pouzzolanes à silice gélatineuse,

dont la combinaison avec la chaux grasse subit à l'air une décomposition qui ressemble à une efflorescence et finit par se ramollir dans l'eau en commençant par les surfaces. Ces pouzzolanes ne pourraient donc être utilisées qu'en massifs revêtus et ainsi dérobés au contact de ces deux milieux.

XXIV.

INFLUENCE

DE LA MASSIVATION SUR LES COMPOSÉS HYDRAULIQUES.

94. — Les mortiers, les gangues à pouzzolanes et les bétons quelconques, peuvent, selon leur destination, être massivés ou battus dans des encaissements, ou dans des fosses de fondation, et acquérir ainsi une grande densité ; mais, pour se prêter à cette massivation, la matière doit avoir acquis une consistance particulière, tenant le milieu entre l'état pâteux et l'état sec ; il n'y aurait pas de compression réelle sur une pâte qui pourrait fuir latéralement sous le pilon ; c'est par cette raison que les maçons piseurs n'emploient la terre que dans un état voisin de la dessication.

Par suite d'une massivation bien exécutée, les mortiers hydrauliques acquièrent en plein air une pesanteur spécifique de 1,930^k à 2,030^k par mètre cube ; sans massivation, mais gâchés fermes, ils arrivent de 1,747^k à 1,885^k, et gâchés mous de 1,260^k à 1,690^k seulement. Leur porosité, représentée par les quantités d'eau dont peut s'imbiber chaque unité de masse, est en moyenne, et respectivement pour chacun des trois cas ci-dessus, de 0,095, 0,123 et 0,219 : conséquemment, la massivation sera d'un très-bon effet pour les mortiers, et par analogie pour les gangues pouzzolaniques destinées à prévenir des infiltrations ou des pertes d'eau, soit comme corrois, soit comme enduits.

Divers échantillons, tirés de carrelages et revêtements d'aqueducs antiques massivés, et composés de fragments de briques concassées, liés par une gangue de chaux grasse, présentaient des densités variables entre 1,340 et 1,760

inclusivement, et une faculté d'imbibition de 0,222 à 0,280 par unité de masse ; ils étaient donc plus perméables que les mortiers hydrauliques, ce qu'explique très-bien leur composition.

95. — Les ciments gâchés fermes et immédiatement comprimés par une presse hydraulique ou d'autres moyens puissants, acquièrent la densité et la texture compacte ; on en forme ainsi pour carrelages des pièces susceptibles de poli. Quelques tentatives ont démontré que sans une adhérence trop forte aux corps gras, ces pierres pourraient servir à la lithographie : il ne serait peut-être pas impossible de corriger ce défaut.

Les indices d'imbibition des ciments, passant de l'air dans l'eau, sont très-variables ; il en est dont les pores peuvent recevoir par unité de masse jusqu'à 0,59 d'eau. Ce chiffre peut descendre à 0,05 pour les ciments comprimés, de 0,09 à 0,08 pour les ciments fortement cuits, et moyennement de 0,18 à 0,13 pour les cas ordinaires. On conçoit, du reste, l'influence que doit exercer la consistance donnée au gâchage.

XXV.

TEMPS

APRÈS LEQUEL LES COMPOSÉS HYDRAULIQUES ATTEIGNENT LEUR COHÉSION FINALE.

96. — Le vieux dicton des maçons, « *qu'à cent ans le mortier n'est encore qu'un enfant,* » ne s'appliquait évidemment qu'aux mortiers à chaux grasse ; nous allons plus loin, en affirmant que, dans nos murailles ordinaires hors de terre et à l'abri de toute humidité pénétrante, ce mortier, pour nous servir de l'expression proverbiale, « *reste dans une éternelle enfance ;* » ce n'est qu'en fondation et après deux à trois cents ans, ainsi que nous l'avons expliqué (47-48), qu'il peut parvenir à une grande dureté par l'intervention de principes étrangers à sa composition première. John, de Berlin, rapporte qu'en démolissant un énorme pilier de la cathédrale de cette ville, construit depuis quatre-

vingts ans, on trouva le mortier de l'intérieur aussi frais que s'il eût été posé de la veille; ce mortier se trouvait dans un cas d'isolement absolu.

La cohésion des bons mortiers hydrauliques, immergés en eau douce ou en eau de mer, lorsqu'ils n'y périssent pas, arrive à son terme après trois ans à peu près, abstraction faite des surfaces qui, recevant peu à peu l'acide carbonique, le laissent, après s'en être saturées, s'insinuer de proche en proche dans l'intérieur, où il détermine un surcroît de cohésion, mais en procédant avec une extrême lenteur.

Les progrès de la cohésion spéciale, indépendante de l'acide carbonique, sont généralement plus rapides, du premier au sixième mois, que du sixième au douzième; du douzième au vingt-quatrième, ils n'ajoutent guère que 1/5 à la cohésion déjà acquise; au-delà de ce terme, l'accroissement de cohésion, s'il a lieu, n'est pas sensiblement appréciable.

La cohésion à laquelle parviennent les mortiers à chaux grasse dans les maisons ordinaires varie, par centimètre carré, de 1^k25 à 2^k00, dans les parties élevées au-dessus du sol et constamment à couvert.

Cette cohésion pour les chaux faiblement hydrauliques, dans les maçonneries exposées à toutes les intempéries, varie de 3^k à 7^k.

Pour les mortiers à chaux hydrauliques ordinaires, dans les mêmes circonstances, de 7^k à 9^k.

Pour les mortiers à chaux éminemment hydrauliques argileuses, toujours dans les mêmes circonstances, de 10^k à 15^k, et enfin de 15^k à 17^k, quand la silice y domine, comme dans l'exemple coté n° 3 (14).

97.—Les gangues à chaux grasse et pouzzolanes de première et de deuxième qualité atteignent, après deux mois d'immersion, la moitié de leur cohésion finale, laquelle arrive du douzième au seizième mois en eau douce, et probablement aussi en eau de mer (*n*). Cette cohésion, variable avec l'énergie des

(*n*) Il semblerait résulter des expériences faites à Toulon, par M. Noël, en 1841, que les gangues à chaux grasse et pouzzolanes d'Italie n'atteignent leur cohésion finale en eau de mer que vers la troisième année; mais les progrès, à partir de la seconde, ne sont pas assez constants et surtout assez marqués pour que l'on puisse généraliser cette observation.

pouzzolanes et les soins apportés à la confection des gangues, dépasse rarement 14^{k} par centimètre carré, et peut même s'arrêter à $5^{k}00$; ces appréciations ne se rapportent qu'aux gangues sans sable et constamment immergées.

L'intervention d'une chaux hydraulique hâte considérablement la prise et le durcissement de toute gangue pouzzolanique, car, après quinze à vingt jours d'immersion, la cohésion est déjà moitié de la cohésion finale, qui arrive du huitième au dixième mois ; ces dernières gangues sont donc très-utiles pour tous les travaux hydrauliques qui auraient à lutter contre des causes de destruction très-prochaines.

98.— Les ciments employés purs, comme on l'a dit (66), font prise les uns en quelques minutes. d'autres en quelques heures, et acquièrent généralement en vingt-quatre heures une résistance ou dureté à laquelle les meilleures gangues pouzzolaniques n'arrivent qu'après dix ou quinze jours. Leur énergie est d'ailleurs si inégale, qu'il est difficile d'assigner autrement que d'une manière approximative la résistance dont ils deviennent capables à des époques données. On peut, toutefois, les partager en trois classes, comme il suit : 1° ciments communs, 2° ciments moyens, 3° et ciments supérieurs.

Les premiers, gâchés à consistance de pâte assez molle pour s'étendre et s'affaisser d'elle-même dans un moule quelconque (*o*), étant immergés quelques minutes après la prise, arrivent en un mois à une ténacité de 3 à 4 kil. par centimètre carré, et de 8 à 10 kil. en cinq mois. Les seconds, aux mêmes époques et dans les mêmes circonstances, atteignent de 4 à 5 kil., puis de 10 à 16 kil. Les derniers, enfin, peuvent s'élever en cohésion de 17 à 20 kil. à la fin du premier mois d'immersion, et jusqu'à 24 ou 30 kil. à la fin du cinquième. Ils sont très-rares et généralement lents à la prise. Ces appréciations ne concernent que les ciments employés purs. L'introduction du sable dans les pâtes y produit des modifications trop variables pour être suffisamment précisées.

Après cinq mois d'immersion, les duretés acquises sont très-voisines de

(*o*) La consistance de cette pâte est plus forte que celle que l'on donne aux coulis ou bouillies assez fluides pour être versées dans des joints de 10 à 12 millimètres de largeur.

l'époque finale; elles varient, non-seulement, comme on vient de le dire, de ciment à ciment, mais aussi chez un ciment également constitué en chaux, silice et alumine, etc., selon le degré de cuisson qu'il a subi et la consistance de gâchage qu'on lui a donnée.

99. — Les duretés qu'acquièrent les ciments, soit au début, soit finalement, dépendent beaucoup aussi des milieux dans lesquels ils sont placés. C'est ainsi que des briques dont la ténacité moyenne n'était que de 3 kil. par centimètre carré au moment de leur exmersion, donnaient de 12 à 16 kil. après quatre à cinq jours de dessication au soleil d'août, et ne redescendaient qu'à 5 ou 6 kil. par l'effet d'une nouvelle immersion, gagnant ainsi en moins de sept à huit jours une force qu'elles n'auraient obtenue qu'après deux ou trois mois d'une immersion constante. On doit juger par là à quelles fausses appréciations on peut être conduit, quand il n'y a pas uniformité dans la manière de conduire des essais comparatifs entre divers ciments.

On conçoit que pour les ciments, comme pour tous les autres composés hydrauliques, nous ne puissions tenir compte de ce que l'intervention de l'acide carbonique ajoute aux cohésions propres de ces composés; son introduction dans les tissus, rencontrant une foule d'obstacles, doit nécessairement être très-lente, et appréciable seulement après un grand nombre d'années; c'est ce que prouve l'analyse d'un très-grand nombre de silicates de ce genre empruntés à des constructions antiques et modernes. L'acide carbonique s'y trouve si inégalement distribué et en quantités si différentes, qu'il a fallu en conclure que, la plupart du temps, il ne s'y trouve incomplétement que d'une manière provisoire, jusqu'au moment où il pourra atteindre et neutraliser toute la chaux.

Si l'on considère maintenant que des gangues extraites de certains bétons exposés aux plus violents coups de mer ont pu y résister pendant un demi-siècle et plus, avec une ténacité de moins de 6 kil. par centimètre carré, on sera convaincu que si, à prix égal, il est naturel de donner la préférence aux ciments de première qualité, il y aurait de la duperie, dans le cas contraire, à se jeter dans un excès de dépense pour obtenir des résistances tout à fait superflues dans la plupart des constructions.

XXVI.

DES MORTIERS ANTIQUES

COMPARÉS AUX MORTIERS DU MOYEN-AGE ET AUX MORTIERS MODERNES.

100. — Les monuments de l'Egypte présentent, sans contredit, les exemples les plus anciens que l'on puisse citer de l'emploi de la chaux dans les constructions; le mortier qui lie les pierres des Pyramides et notamment celles du Chéops, est exactement semblable à nos mortiers d'Europe; celui qu'on aperçoit entre les joints des édifices dégradés, à Ombos, à Edfou, dans l'île de Philæ, et en d'autres lieux, décèle, par sa couleur et son grain, la présence d'un sable rougeâtre très-fin, mêlé avec la chaux dans les proportions ordinaires. L'usage du mortier était donc connu déjà plus de deux mille ans avant notre ère.

En bornant généralement l'emploi du mortier au remplissage des joints très-étroits qui séparent les blocs énormes dont se composent leurs monuments, et en lui assignant par là un rôle presque insignifiant, les Egyptiens semblaient pressentir l'influence contraire qu'un climat sec et brûlant exerce sur le durcissement et la durée de ce composé; le temps a fait voir combien leur prudence ou le hasard les servit sous ce rapport, car les travaux des Romains, sur les bords du Nil, ne laissent déjà plus de traces, tandis qu'après vingt siècles quelques temples égyptiens se présentent à notre admiration encore intacts.

Il est vrai de dire que la maçonnerie à petits matériaux ne pouvait guère convenir à un peuple qui sculptait sur les faces de ses monuments l'histoire de ses mœurs, de ses arts, de ses guerres et de ses conquêtes. La brique crue, cimentée avec l'argile, suffisait aux simples habitations, et sous un ciel constamment sans nuages, cette manière de bâtir était aussi sûre qu'expéditive et économique.

Ce fut dans la patrie des beaux-arts, dans cette Grèce si féconde en inven-

tions ingénieuses, que l'industrie, stimulée par les exigences d'un climat tout différent, parvint à varier l'emploi de la chaux et à l'étendre à une foule d'usages inconnus à l'Egypte. Dans la suite, les colonies grecques importèrent et popularisèrent leurs procédés en Italie; les architectes romains purent s'instruire, d'ailleurs, au rapport de Vitruve, dans les écrits que les auteurs grecs, dont il cite les noms, avaient publiés sur l'art de bâtir. Ces écrits ne sont point parvenus jusqu'à nous; Vitruve put y puiser tout ce qu'il nous en a transmis; c'est donc à son ouvrage qu'il faut recourir, quand il s'agit d'éclaircir quelque point de controverse sur les procédés de construction en usage à ces époques reculées. Or, il est impossible d'y rien trouver qui puisse faire croire à des procédés particuliers dont le secret se serait perdu. Tout ce qui a trait à la chaux, au sable et à la pouzzolane, y est clairement exposé (*p*).

D'après Vitruve, les constructeurs romains regardaient comme chaux par excellence celle qui provient du marbre le plus pur et le plus dur, c'est-à-dire la chaux la plus grasse possible. La chaux hydraulique et le produit moderne que nous appelons *ciment* leur étaient totalement inconnus; aussi ne pouvaient-ils se passer de pouzzolanes dans leurs travaux hydrauliques, tels que môles à la mer, aqueducs, citernes, etc. Hors de l'Italie, dans les Gaules, par exemple, ils remplaçaient la pouzzolane du Vésuve, d'un transport trop dispendieux, par la brique ou tuile pilées.

101. — Les mortiers romains se ressemblent généralement; on les reconnaît à la présence d'un gros sable mêlé de gravier; les grumeaux de chaux y sont quelquefois tellement multipliés, qu'il est impossible d'attribuer leur présence à un défaut de broyage; l'extinction incomplète de la chaux grasse, par aspersion ou immersion, peut seule en rendre raison. Ceux de ces mortiers que l'on destinait aux lieux humides, aux citernes, aux rigoles et aux carrelages (*pavimenta*), se composaient ordinairement de fragments de briques concassées, depuis la grosseur d'une petite noix jusqu'à celle du gravier, enchâssés

---

(*p*) Les auteurs cités par Vitruve sont Anaxagore, Agatarchus, Pitheus, Théocides et autres. Fussitius publia le premier livre d'architecture qui ait paru à Rome; après lui, vinrent Terentius Varron, Publius Septimius, et enfin Vitruve, qui vivait sous Auguste, dont il était l'architecte.

dans une gangue de chaux grasse ; cette espèce de béton ne pouvait faire corps que par une dessication aidée d'une massivation soignée et très-laborieuse ; on dérasait ensuite les surfaces pour les polir et y passer une couche de peinture, destinée, probablement, à empêcher la dissolution de la chaux au contact de l'eau. Le revêtement de la cunette de l'aqueduc du Gard offrait, il y a quelques années, un exemple curieux de ce bétonnage, masqué par une épaisse incrustation naturelle de chaux carbonatée ; ce qui prouve que les eaux conduites à Nimes par les Romains tenaient en dissolution une notable quantité de bicarbonate de chaux.

102. — L'excellence qu'une admiration aveugle a attribuée indistinctement à tous les mortiers romains, et, par suite, la supposition d'un procédé particulier de fabrication, dont le secret se serait perdu, sont autant d'exagérations et d'erreurs faciles à réfuter : et d'abord, bien que la décadence des arts ait suivi celle de l'empire romain, on n'en a pas moins continué à bâtir ou à réparer des maisons, et les procédés usuels, toujours sous la main des ouvriers, ont dû se transmettre de père en fils jusqu'aux derniers âges ; et cela est tellement vrai, qu'aujourd'hui encore les maçons italiens, qui certainement n'ont pas lu Vitruve et n'ont rien perfectionné, confectionnent les enduits de citernes et les carrelages en béton, comme on les retrouve dans les ruines antiques. Il n'est pas vrai ensuite, et à beaucoup près, que les mortiers romains soient partout et toujours également bons ; nous en avons soumis un assez grand nombre, pris dans des localités très-éloignées les unes des autres, à des épreuves comparatives desquelles il est résulté que pour quelques échantillons, dont la cohésion par centimètre carré a pu s'élever de 8 à 11 kil., quantité d'autres sont restés entre 2k50 et 6 kil. Si les maçonneries romaines eussent été toujours et partout également bonnes, le temps seul n'eût point effacé tant de constructions, tant de monuments, dont on retrouve à peine aujourd'hui des traces informes, car la barbarie n'avait aucun intérêt à les détruire entièrement, attendu qu'elle y eût trouvé plus de peine que de profit, l'usage de la mine étant alors inconnu.

Il est d'ailleurs de notoriété publique, et cela se voit fréquemment, qu'il faut employer la poudre quand on a à démolir de vieux remparts, de vieux châteaux et autres constructions datant du moyen-âge ; faudrait-il en conclure

que le secret des Romains était encore connu à cette époque, et ne se serait perdu que beaucoup plus tard, précisément à la Renaissance où, moins que jamais, cette supposition est admissible? Affirmons donc, au contraire, avec Vitruve, que les Romains employaient la chaux, le sable et les matériaux mêmes du pays où ils bâtissaient, et cela comme nous le faisons aujourd'hui ; ajoutons que l'analyse chimique de leurs mortiers n'y a fait découvrir aucun principe qui ne soit aussi dans les nôtres, mais que, par l'action séculaire de l'acide carbonique, et, dans beaucoup de cas, par l'accession de principes capables d'attaquer le sable et d'en rendre la silice susceptible de se combiner avec la chaux, ces mortiers ont pu arriver au degré de dureté que nous admirons, comme aussi rester très-médiocres quand ces moyens de progrès leur ont manqué (47-48).

Notre grande supériorité depuis 1820, dans cette partie de l'art de bâtir, est désormais incontestable; la chimie nous a appris par quelles voies les principes qui concourent à la solidification des composés calcaires, objet de ces études, se rapprochent, s'enchaînent dans les liens intimes d'une combinaison chimique, et nous a mis en mesure, par les proportions, le choix raisonné et la préparation des matériaux, de satisfaire à toutes les exigences des constructions. Tel est le progrès actuel sous ce rapport, qu'après quelques mois avec nos mortiers à chaux éminemment hydraulique, et après quelques jours avec certains ciments (65), nos maçonneries peuvent égaler en solidité les meilleures maçonneries antiques.

QUATRIÈME PARTIE.

XXVII.

ACTION DE L'EAU DE MER

SUR LES COMPOSÉS HYDRAULIQUES QUELCONQUES, MORTIERS, CIMENTS ET GANGUES A POUZZOLANES.

PRÉLIMINAIRES.

103. — Indépendamment du sel marin ou chlorhydrate de soude, à dose de 25 à 27 millièmes, l'eau de mer contient des sulfates et des chlorhydrates de magnésie, ainsi qu'une foule d'autres principes accidentels, tels que bicarbonates, acide carbonique dissous en quantités variables dans le voisinage des côtes, sels ammoniacaux de diverses natures, matières animales dissoutes ou en suspension, semences végétatives, etc. Les sels peuvent n'être pas tous formés selon les désignations précédentes, mais leurs éléments existent, et, sur ce point, les chimistes qui ont analysé l'eau de mer sont parfaitement d'accord. Voici quelques analyses pouvant donner une idée des variations observées dans sa composition :

ANALYSES D'EAU DE MER PAR DIVERS CHIMISTES.	PRÈS DE BAYONNE.	COTES DE LA MÉDITERRANÉE.		Atlantique du nord.	MANCHE.
Principes contenus.	Bouillon, Lagrange et Vogel.	Bouillon, Lagrange et Vogel.	Laurent.	Marcet.	Schweitzer.
Chlorhydrate de soude	25 10	25 10	27 22	26 60	27 06
Sulfate de magnésie	5 78	6 25	7 02	»	2 29
Chlorhydrate de magnésie	3 50	5 25	6 14	5 15	3 66
Sulfate de chaux	0 15	0 15	0 10	0 15	1 41
Sulfate de soude	»	»	»	4 66	»
Chlorhydrate de potasse	»	»	0 01	1 23	0 76
Chlorhydrate de chaux	»	»	»	»	»
Carbonate de chaux	0 20	0 15	0 20	»	0 03
Acide carbonique	0 23	0 11	traces.	»	traces.

Si l'on verse de l'eau de chaux dans de l'eau de mer, il s'y forme sur-le-champ du sulfate et du chlorhydrate de chaux, et il se précipite de la magnésie rendue libre ; le même fait s'observe lorsqu'on place dans de l'eau de mer, à l'état frais ou pâteux, un mortier, un ciment ou une gangue à pouzzolane ; il a lieu, encore, pour les mêmes composés parvenus à un degré de cohésion très-avancé, quand l'acide carbonique n'a pas agi sur leurs surfaces. L'affinité des acides sulfurique et chlorhydrique pour la chaux est donc non-seulement assez puissante pour produire ces effets, mais encore pour enlever cette base à ses combinaisons avec la silice et l'alumine ; c'est ainsi que toutes les gangues à pouzzolanes, tous les ciments et toutes les chaux hydrauliques sont décomposés par les dissolutions, même très-étendues, de sulfate ou de chlorhydrate de magnésie, lorsqu'on les y projette à l'état de poudres impalpables. Tous ces silicates, cependant, ne sont pas également attaqués ; quelques-uns peuvent retenir une partie de leur chaux, mais qui n'est jamais qu'une fraction assez petite de la totalité,

Si donc la cohésion qui résulte de la structure solide ou massive de ces composés ne pouvait atténuer ou paralyser d'aucune manière l'action des sels magnésiens, il faudrait désespérer à jamais de la stabilité ou durée en mer des silicates doubles d'alumine et de chaux formés par voie humide, c'est-à-dire de nos mortiers, ciments et gangues à pouzzolanes ; heureusement qu'il n'en est pas toujours ainsi, comme la suite va le prouver.

104. — Les premières observations sur l'action destructive qu'exerce l'eau de mer ne datent que de quelques années ; il a fallu que de grands désastres, arrivés à Saint-Malo, à la Rochelle, au Hâvre, etc., vinssent avertir les ingénieurs, et, par suite, le gouvernement, pour que l'on se préoccupât sérieusement des causes du mal. Ce n'est pas que l'action saline ne se soit exercée dans tous les temps sur les maçonneries sous-marines, mais dans des circonstances et d'une manière assez restreintes pour qu'il fût permis d'attribuer ses effets à l'action dynamique des vagues et à celle du temps.

Les causes une fois connues et le problème posé, la solution pratique a dû sembler des plus faciles au premier abord ; de quoi s'agissait-il, en effet ? de distinguer, entre les composés divers que donnent les matériaux connus, chaux, ciments et pouzzolanes, quels sont ceux que la mer respecte ou détruit ;

il suffisait donc d'immerger les uns et les autres, d'attendre les résultats et de faire un choix ; c'est ce que très-probablement on a tenté, et rien de certain, rien de positif, n'est sorti de cette manière de procéder. On a vu, en effet, se produire en certains parages et sur des composés identiques, des phénomènes directement contraires ; tel ciment qui résistait à Saint-Jean de Luz était détruit au Boyard sur les côtes de la Rochelle. Telle combinaison de chaux et de pouzzolane, admise comme bonne à Toulon, ne réussissait ni à Alger, ni sur l'Océan ; et ce qui rendait la difficulté plus grande encore, c'est que la mer ne répondait qu'après un très-long temps, quelquefois après plusieurs années, aux questions posées de cette manière.

Cet état de choses nous imposait le devoir de reprendre le travail publié en 1846 à la suite de nos nouvelles études sur les pouzzolanes artificielles, travail nécessairement incomplet à cette époque, et de suivre de plus près la marche des phénomènes, en profitant d'ailleurs des observations nombreuses faites dans plusieurs de nos ports, observations qui, rapprochées et comparées, ont jeté une grande lumière sur les causes et les effets de l'action saline. Les détails circonstanciés de ces nouvelles recherches, les faits chimiques et analyses à l'appui, composent le Mémoire spécial adressé en 1854 comme pièce de concours à la Société d'encouragement pour l'industrie nationale. Ce Mémoire, qui intéresse particulièrement les ingénieurs ayant à projeter et à diriger des travaux à la mer, sera publié à part, *in extenso*, dès que la Société d'encouragement se sera prononcée sur l'utilité de cette publication. L'extrait que nous en donnons ici ne pouvait s'étendre au-delà des limites adoptées selon le plan et l'esprit de ce traité.

105. — Lorsqu'on analyse les débris, devenus stationnaires, d'un composé hydraulique désagrégé par l'action saline, on y trouve immédiatement : 1° un résidu de sable ou de matières pouzzolaniques, selon que la destruction a porté sur un simple mortier ou sur une gangue à pouzzolane ; 2° du carbonate de chaux ; 3° de la magnésie libre ou combinée, ou carbonatée ; 4° et enfin quelques centièmes de sulfates de chaux et de magnésie, si l'on n'a pas suffisamment lavé les débris à l'eau pure avant de les analyser.

Si l'on pouvait rapprocher ces mêmes débris et les reconstituer en un tout physiquement cohérent et résistant, il est évident que l'eau de mer ne pourrait

exercer aucune action chimique sur ce nouveau corps, qui ne contiendrait plus les éléments de destruction éliminés par l'eau de mer elle-même.

106. — Lorsqu'on analyse, au contraire, les parties prises à quelques centimètres au-dessous de la croûte verdâtre qui tapisse certains composés hydrauliques immergés depuis un assez grand nombre d'années pour ne laisser aucun doute sur la persistance indéfinie de leur stabilité, on y retrouve parfois, en totalité, les éléments du composé primitif sans intervention d'autres principes, et, chose remarquable, ces parties tirées de l'intérieur sont le plus souvent attaquées et détruites en quelques jours dans la même eau de mer employée dans le laboratoire. La mer libre peut donc laisser subsister dans toute l'intégrité de leur composition première, c'est-à-dire avec toute leur chaux attaquable, certains silicates destructibles par son action dans le laboratoire. Mais dans le premier cas elle a dû s'interdire elle-même tout accès dans leur intérieur, par l'effet des enduits végétatifs, madréporiques ou coquilliers, dont elle les a enveloppés.

L'analyse d'autres composés aussi indestructibles que les précédents en mer libre y dénote quelquefois une constitution chimique nouvelle, qui a la plus grande analogie avec celle du corps fictif dont nous parlions tout-à-l'heure, et qui ne peut donner conséquemment aucune prise aux sels magnésiens. Ces silicates, TRANSFORMÉS, sont alors aussi inattaquables par l'eau de mer employée dans le laboratoire que par la mer libre; dans les deux cas, l'eau de mer peut donc, sans les détruire, introduire parfois dans le tissu de certains silicates d'alumine et de chaux des principes nouveaux, en même temps qu'elle en élimine ou modifie ceux qui sont contraires à la stabilité (*q*).

De là, trois classes de composés hydrauliques par rapport à l'action saline, savoir :

1° Ceux qui résistent par l'effet d'un changement de constitution chimique

---

(*q*) Les silicates indestructibles auxquels on fait allusion résultent généralement des combinaisons de la chaux grasse avec les pouzzolanes provenant d'argiles réfractaires pures ou à très-peu près pures, très-peu cuites. L'histoire complète de ces silicates sera le sujet d'un Mémoire spécial.

intégral ou limité en profondeur, que la mer y opère spontanément, et qui n'ont par conséquent besoin d'aucun enduit préservateur;

2° Ceux qui ne subsistent et ne peuvent subsister que sous la protection de ces mêmes enduits;

3° Ceux enfin sur lesquels ces enduits ne peuvent se maintenir, et qui périssent par l'effet même des transformations chimiques que la mer tend à y introduire.

Les premiers peuvent être reconnus et appréciés par certaines expériences de laboratoire à l'aide desquelles on exerce sur eux une action purement saline, c'est-à-dire indépendante des éléments conservateurs que renferme la mer libre; on peut donc, quand ils résistent à cette épreuve, conclure *a fortiori* qu'ils résisteront en mer libre, puisqu'ils y trouveront certains auxiliaires qui viendront ajouter à leur valeur intrinsèque.

Quant aux composés de la deuxième et de la troisième catégorie, les essais de laboratoire ne peuvent que les classer par ordre de stabilité, attendu que l'eau de mer naturelle ou artificielle que l'on y emploie ne possède plus cette espèce de vitalité qui produit les végétations sous-marines et les sécrétions d'origine animale dont s'enveloppent les corps immergés. Donc, pour ces derniers, il n'y a que la mer dans toute la liberté de ses courants et de son agitation, et avec tous ses éléments hétérogènes, constants ou accidentels, qui puisse répondre aux questions de stabilité ou de non stabilité, et nous avons dit à quelles conditions et sous quelles réserves (104).

XXVIII.

OBSERVATIONS

QUI ONT CONDUIT AU MODE D'ESSAI EMPLOYÉ DANS LE LABORATOIRE.

107. — On se bornera dans ce qui va suivre, ainsi qu'on l'a déjà dit, à produire comme exactes, abstraction faite des expériences, analyses et autres

détails à l'appui, réservés pour une publication spéciale, les seules observations que puissent comporter le plan et les limites de ce traité, observations qui ont motivé le nouveau mode d'essai à appliquer à tous les composés hydrauliques dont on veut connaître la valeur pour les travaux à la mer.

Les voici par ordre :

1° Tous les composés où la chaux n'entre que lentement en combinaison avec les principes qui la neutralisent, étant plongés frais en eau de mer, sont attaqués d'autant plus profondément que la chaux y reste plus longtemps libre en tout ou en partie. L'immersion immédiate d'échantillons d'un volume nécessairement très-limité ne peut donc, dans un laboratoire, que signaler comme destructibles indistinctement tous les silicates à prise lente.

2° D'un autre côté, l'immersion de ces silicates, effectuée longtemps après leur confection, laisse à l'acide carbonique de l'air le temps de régénérer en carbonate neutre et sur une certaine profondeur la chaux de leurs parties superficielles, ce qui les enveloppe d'une croûte inattaquable et imperméable à l'eau salée dans plusieurs circonstances. Dans ce cas donc, l'immersion ne peut plus rien apprendre sur la valeur des échantillons ainsi garantis.

3° Des deux observations qui précèdent, il résulte nécessairement que les silicates à essayer doivent avoir atteint en *vase clos*, hors de toute influence extérieure, un degré de cohésion chimique plus ou moins avancé avant d'être mis en contact avec l'eau salée.

4° Une autre nécessité, c'est de pouvoir facilement se rendre compte de l'action saline, c'est-à-dire de sa marche plus ou moins rapide, de sa continuité ou de sa fin, sur les échantillons en expérience. Et comme toute action exercée par les bains d'immersion réagit sur leur propre composition et peut s'apprécier à une époque quelconque par leur état actuel comparé à leur état initial, il faut s'attacher à rendre cette comparaison aussi simple et aussi facile que possible.

5° Or, sept années d'expériences comparatives ont prouvé qu'une simple dissolution très-étendue de sulfate de magnésie (4 ou 5 grammes de sel anhydre dans mille grammes d'eau pure, ou 8 à 9 grammes du même sel avec son eau de cristallisation), produit, ni plus ni moins, sur les échantillons qu'elle baigne les mêmes effets que l'eau de mer elle-même.

6° Cela étant, tant que la dissolution magnésique agit sur les échantillons,

elle se charge de sulfate de chaux et abandonne de la magnésie, ce que l'on constate par l'oxalate d'ammoniaque qui précipite la chaux à l'état d'oxalate insoluble. Quand, au contraire, le bain d'immersion ne se trouble plus sous l'influence de l'oxalate, son action actuelle sur les échantillons qu'il contient est absolument nulle, ce qui n'empêche pas l'action qui a précédé d'avoir plus tard telle ou telle conséquence sur leur stabilité (r).

7° Le moment où cessera cette action du bain magnésique peut se faire attendre plusieurs jours, plusieurs mois et même plusieurs années, selon la nature des silicates immergés, sans que dans ce dernier cas il y ait danger de destruction.

Telles sont les considérations d'où l'on est parti pour tracer, ainsi qu'on le verra dans la section suivante, la marche à suivre dans ce genre d'expériences.

MARCHE A SUIVRE DANS L'APPLICATION DU NOUVEAU PROCÉDÉ.

108. — On introduit les mortiers, ou gangues à chaux et pouzzolanes, ou ciments encore à l'état pâteux, dans des bocaux de verre blanc que l'on puisse clore ensuite hermétiquement à l'aide de rondelles de liége ou de bois goudronnées par-dessus; les composés pâteux y durcissent comme ils le feraient au sein d'un épais massif, et après un temps qui ne doit pas être de moins d'un mois, mais qui peut aller bien au-delà si l'on veut ou si la nature du composé l'exige, on brise les bocaux qui ont servi de moules, on taille les échantillons en parallélipipèdes ou en cylindres (ces formes peuvent être données immédiatement par les bocaux), en leur ménageant des arêtes aussi vives que possible ou en avivant celles que le moulage a émoussées; on les lave ensuite à l'eau pure en les brossant assez fortement pour enlever toutes les parcelles séparées de la masse par l'action de la taille, après quoi on les immerge dans une dissolution de sulfate de magnésie, préparée comme il a été dit (107); le volume

---

(r) L'eau de mer naturelle contient constitutivement des sels à base de chaux en doses variables, pouvant rendre tout à fait illusoires ou du moins d'une application très-difficile les moyens de vérification proposés ci-dessus.

de ce bain doit équivaloir à environ cinq ou six fois celui de la pièce immergée. Il faut le renouveler tous les jours si l'oxalate d'ammoniaque y forme des précipités abondants, et tous les cinq ou six jours si ce sel n'y produit qu'un *louche* sensible. On considère cette première épreuve comme terminée quand l'oxalate ne trouble plus la dissolution magnésique. Mais si l'on opère en hiver, dans un laboratoire dont la température ne soit que de 10 à 12° centigrades, il faudra, avant de prononcer sur cette nullité d'action de l'oxalate, s'en assurer définitivement après avoir élevé et maintenu la température du bain à 40 ou 50° centig. pendant une journée.

Les conséquences de cette première phase des essais peuvent se montrer pendant leur durée même ou beaucoup plus tard; dans ce cas, on met en réserve le bocal et l'échantillon contenu, en couvrant légèrement le tout de manière à empêcher, comme on a dû le pratiquer précédemment, l'introduction de la poussière, mais non le renouvellement et l'action de l'air. On maintient le niveau du bain par des additions successives d'eau distillée, selon que l'évaporation le demande.

On voit assez souvent se former dans plusieurs de ces bains des dépôts très-blancs qui s'attachent à la fois aux parois des bocaux et aux échantillons. Il faut alors sortir ces échantillons, les brosser fortement, et si cela ne suffit pas pour les dépouiller des incrustations, les plonger pendant quelques secondes dans un acide très-étendu, qui les en débarrasse complétement. On les lave ensuite à l'eau pure, et on les remet dans une nouvelle dissolution dont il faut suivre de nouveau l'altération; si elle a lieu, il est sous-entendu que l'on nettoie en même temps les bocaux pour leur rendre leur transparence (*s*).

C'est ordinairement par des fissures parallèles aux arêtes des angles dièdres que se manifestent les premiers effets de l'action saline, quand ils ont lieu. Dès qu'elles apparaissent, le sort de l'échantillon est décidé : il périra infailliblement; ce n'est plus qu'une affaire de temps; la deuxième ou quatrième année au plus tard en amène la ruine. L'apparition de ces fissures, dans le cas des composés destructibles, n'a point d'époque fixe; elle peut se déclarer après

(*s*) Ces matières incrustantes sont formées en proportions variables d'une petite quantité de chaux, et d'une notable quantité de magnésie et d'acide carbonique en quantité insuffisante pour saturer les deux bases à la fois.

huit à dix jours comme après huit à dix mois, mais très-rarement au-delà de ce dernier terme. Des exceptions pourraient se présenter et reculer cette époque jusqu'au vingtième mois pour des combinaisons *de pouzzolanes et de chaux hydrauliques*, ou pour certains *mortiers à chaux hydrauliques artificielles*. Quand donc on aura à essayer des composés de ce genre, il faudra, pour abréger le temps, avoir soin, en les sortant des vases clos où ils ont dû acquérir le degré de cohésion recommandé ci-devant pour le succès des expériences, il faudra, disait-on, les passer par l'eau pure et *aussi en vases clos*, jusqu'à épuisement de toute la chaux qu'ils peuvent y laisser dissoudre, en renouvelant cette eau essayée de temps en temps par l'oxalate d'ammoniaque; après quoi on procédera par les dissolutions magnésiques, comme il a été dit ci-devant. De cette manière, le temps de l'apparition des fissures, lorsqu'il devra s'en former, sera abrégé moyennement de moitié pour les mortiers, et des quatre cinquièmes pour les combinaisons de pouzzolanes et de *chaux hydrauliques*. Le passage par l'eau pure produirait un effet contraire sur les ciments, c'est à-dire qu'il tendrait à retarder plutôt qu'à accélérer leur destruction, si elle devait avoir lieu.

Dans certains cas, les signes d'altération s'annoncent à la fois par des fissures près des arètes et par des crevasses sur les flancs des échantillons; leur ruine est alors imminente. On voit sur certains ciments, très-chargés en chaux et très-fortement cuits ou frittés, ces signes se montrer d'abord au sommet des angles trièdres (s'ils sont taillés en parallélipipèdes) par des pustules d'où sort une matière floconneuse blanche qui n'est autre que du carbonate de chaux mêlé d'un peu de carbonate de magnésie avec traces d'alumine.

L'absence de ces divers symptômes d'une destruction totale plus ou moins prochaine n'a pas toujours la signification que l'on serait tenté de leur attribuer. L'altération peut quelquefois exister, sans qu'aucun indice apparent, visible même à la loupe, en avertisse; par cette raison, l'examen intérieur, que nous appellerons *autopsie*, deviendra dans tous les cas indispensable, surtout quand les échantillons auront abandonné longtemps, ou même sans discontinuer, de la chaux aux bains magnésiques.

109. — Quand donc tous les échantillons, sans exception, seront parvenus jusqu'au dixième mois d'immersion, en apparence ou réellement intacts, on

procédera à cette autopsie en les sciant ou en les cassant le plus franchement possible en deux ou trois morceaux. L'altération intérieure, si elle existe, se manifeste alors tantôt par une perte de consistance qui, sous une croûte mince et plus ou moins résistante, pénètre plus ou moins profondément l'échantillon, et tantôt par des solutions de continuité apparentes ou non qui divisent la masse en fragments irréguliers ou en zones concentriques autour d'un noyau central. Ces divers modes de décomposition physique, dont l'existence, sans qu'on en soit averti, a lieu dans un liquide tranquille, ne pourraient s'effectuer dans une mer agitée sans être suivis progressivement de la ruine des masses immergées (*t*).

Quant aux pièces réellement intactes dans leur constitution physique à cette époque de dix mois d'immersion, leurs cassures, lorsqu'il s'agit de mortiers ou de ciments, sont parfaitement égales d'aspect et de dureté sur toute leur étendue. La loupe n'y découvre aucune trace d'altération. Les cassures des gangues à pouzzolanes, dans les mêmes circonstances de stabilité, sont ordinairement comme encadrées de bandes plus ou moins larges, dont la couleur est plus claire ou plus foncée que celle du centre. Ces bandes, qui résultent, comme le prouve leur analyse, d'une modification chimique dans la composition du silicate auquel elles appartiennent, sont comme soudées aux parties intérieures, quoique parfois moins et parfois plus dures que celles-ci.

Ces indications, néanmoins, ne sont pas une garantie suffisante pour l'avenir; la vraie pierre de touche, l'expérience complémentaire qui ne doit laisser aucun doute, consiste à immerger de nouveau les fragments donnés par l'autopsie, dans une dissolution de sulfate de magnésie, mais après les avoir soigneusement débarrassés des parties ébranlées ou presque détachées de la masse par l'effet du sciage ou du cassage. On conduit cette nouvelle épreuve

---

(*t*) Nous sommes parvenu à conserver pendant très-longtemps dans les bains magnésiques, sous cette apparence de stabilité, des mortiers à chaux grasse dont les surfaces avaient eu le temps de s'encroûter d'une mince couche de carbonate de chaux avant leur immersion. L'autopsie laissait voir sous cette couche un mortier frais sans consistance, traversé en divers sens par des filons de sable pur dont la chaux avait été soustraite par la dissolution magnésique ayant pénétré, par quelques solutions de continuité, sous la couche carbonatée enveloppante.

comme on l'a fait pour la première, et si pendant les cinq ou six mois qui suivent les fragments se maintiennent intacts, le composé auquel ils appartiennent peut être admis comme indestructible en mer libre. Nous disons en mer libre, car cette seconde épreuve, prolongée jusqu'au dixième mois (ce qui conduirait à vingt mois d'immersion continue), serait probablement trop forte pour le laboratoire, s'il s'agissait de mortiers hydrauliques. Nous avons en effet remarqué que, parmi nos briques à sable et chaux du Theil, quelques-unes, à ce terme de dix mois de contre-épreuve, ont laissé voir sur les arêtes contiguës aux sections de rupture de légers signes d'altération. Or, ces briques étaient ni plus ni moins composées comme les mortiers à chaux du Theil qui lient depuis bientôt dix ans les blocs immergés à Marseille et à Port-Vendre, lesquels blocs sont intacts. Les signes *tardifs* d'altération dont nous parlons ne sauraient donc infirmer pour la mer libre la valeur des mortiers sur lesquels ils se manifestent.

La même contre-épreuve, appliquée aux ciments indestructibles ainsi qu'aux gangues à pouzzolanes de la première classe (106), peut être prolongée indéfiniment sans qu'aucun indice tardif vienne démontrer le danger de cette prolongation. Ces gangues n'en continuent pas moins à abandonner comme auparavant de la chaux aux nouveaux bains magnésiques dans lesquels elles sont plongées, et cela jusqu'à ce que toute leur masse ait subi la transformation indiquée ci-devant (106). Le terme de ce travail intime peut se faire attendre un grand nombre d'années sans qu'il y ait le moindre danger pour la stabilité ; mais si l'on tient à en voir la fin pour se rendre compte des changements chimiques opérés, il faut réduire le volume des fragments à n'avoir que deux à trois millimètres au plus dans leur plus forte épaisseur, chose facile, en détachant des échantillons, avec une lame de couteau sous le choc d'un petit marteau, des esquilles que l'on subdivise encore, si besoin est, pour en rendre la transformation intégrale plus prompte. La parfaite conservation de ces petits éclats à arêtes vives et tranchantes, dans leurs formes et dimensions, sous l'influence continue des bains magnésiques, est la preuve la plus forte et la plus évidente qu'il soit possible de donner de leur durée indéfinie, et conséquemment de celle des masses dont on les a détachés ; parvenus au terme de leur transformation, ils ne contiennent plus, indépendamment de la totalité des pouzzolanes employées, que du carbonate de chaux, de la magnésie et du carbonate de magnésie ; et s'il s'y trouve parfois de la chaux non carbonatée, c'est qu'elle faisait partie

constituante des pouzzolanes à l'état de silicate non attaquable, comme dans celles de Naples et de Rome.

110. — Le grand nombre de mortiers, de ciments et de gangues à pouzzolanes qui ont succombé aux épreuves que nous venons de décrire, en démontrent par cela même toute l'importance ; parmi les mortiers proprement dits, ceux dont les chaux *naturelles* contenaient, sous des indices variables, de 0,30 à 0,44 (13) cinq à six fois plus de silice que d'alumine, ont seuls résisté. Bien peu de ciments ont conservé leurs arêtes intactes jusqu'au dixième mois (*u*), et parmi les pouzzolanes volcaniques, celle de Rome, seule et *de premier choix*, a pu fournir, avec la chaux grasse et par une manipulation très-soignée, des gangues indestructibles.

Toutes les pouzzolanes artificielles provenant d'argiles blanches réfractaires pures ou à peu près pures, et par exception de quelques argiles ocreuses, cuites les unes et les autres très-modérément, ont au contraire fourni, avec 15 p. 100 de chaux grasse pesée vive et éteinte en pâte, des silicates parfaits pour l'eau de mer et présentant ce phénomène de substitution qui, sans nuire en rien à la résistance continue des gangues immergées, leur enlève peu à peu la chaux et la remplace par la magnésie.

(*u*) Quelques-uns de ces ciments se sont améliorés par une forte cuisson, sans aller toutefois jusqu'à la fusion pâteuse, au point, les uns de résister complétement, les autres de maintenir leurs arêtes intactes pendant sept à huit mois, et de n'être encore que très-peu endommagés après deux ans. Or, il serait possible qu'en mer libre cette longue résistance donnât à l'acide carbonique, aux sécrétions madréporiques et aux végétations sous-marines, le temps d'encroûter les surfaces, en mettant ainsi les masses à l'abri de toute attaque. Les rapprochements que nous avons faits pour reconnaître s'il serait possible de conclure quelque chose de la composition en chaux et argile des diverses variétés de ciments du commerce, relativement à leur dureté finale comparée à leur stabilité en eau de mer, semblent indiquer : 1° qu'il n'existe aucun rapport entre cette stabilité et la dureté ; 2° qu'indépendamment de la composition de l'argile en silice, alumine et magnésie, s'il y en a, la chance de stabilité est d'autant plus grande que la quotité de ces trois principes est plus près d'égaler celle de la chaux dans le ciment, et qu'en prenant celle-ci pour unité, 0,80 devient la limite au-dessous de laquelle la dose d'argile (fer non compris) ne doit jamais se trouver. Il suit de là que les ciments chargés en chaux, quel qu'en soit le degré de cuisson, ne conviennent pas aux travaux à la mer.

111. — Nous ne prétendons pas, cependant, qu'il faille renoncer à employer tous les composés hydrauliques que notre mode d'investigation signale comme destructibles, s'ils ont en leur faveur, depuis un grand nombre d'années, le témoignage contraire de la mer libre; nous croyons seulement qu'il ne faut alors s'écarter en rien des précédents, c'est-à-dire que, dans la supposition d'une identité rigoureuse de matériaux, il faudrait encore adopter les mêmes dosages, le même mode de confection et d'emploi, et toujours, autant que possible, dans les mêmes parages et la même situation, par rapport aux coups de mer.

On ne pourrait en effet, sans danger, s'autoriser pour de nouveaux parages des exemples de succès obtenus sur quelques points de l'Océan ou de la Méditerranée. Ces mers, selon la nature des roches qui en forment le fond et les rivages, selon leurs courants et leurs affluents, et peut-être aussi par l'effet de leur température moyenne, peuvent fournir des quantités d'acide carbonique très-différentes et ne pas nourrir également ces masses de mollusques dont les sécrétions concourent avec cet acide à encroûter si efficacement les corps immergés (r). Or, ne pas tenir compte de ces causes plus ou moins efficaces de conservation, serait une faute dont les conséquences pourraient être déplorables.

(r) La présence du bicarbonate de chaux dans les mers peut seule rendre compte de certains phénomènes d'incrustation remarqués sur les débris des môles antiques disséminés le long du rivage de Pouzzoles. Ces incrustations, qui consistent en une épaisse couche de tuf calcaire, n'ont pu être formées que par le carbonate de chaux déposé à mesure que les bicarbonates ambiants cédaient de l'acide carbonique à la chaux des bétons.

Les sulfates contenus dans l'eau de mer ne suffiraient pas à expliquer les quantités de chaux qu'elle contient; ils fourniraient au plus (103) 0g06 de chaux caustique par mille grammes; or, les documents qui nous sont parvenus établissent incontestablement qu'à Brest cette quantité est de 0g456, à Marseille de 0g654, à Alger de 0g922, et à Pondichéry, dans l'Inde, de 0g512. Il est probable qu'à raison du voisinage du Vésuve et des émanations souterraines d'acide carbonique, la mer de Naples contient plus de bicarbonate de chaux que toute autre mer, et possède conséquemment des moyens d'encroûtement refusés à d'autres parages.

DES SILICATES INATTAQUABLES OU LA MAGNÉSIE REMPLACE LA CHAUX.

112. — La substitution de la magnésie à la chaux, opérée spontanément par l'eau de mer dans certaines gangues à chaux et pouzzolanes rendues par là indestructibles, conduisait naturellement à essayer la voie synthétique pour atteindre immédiatement le même but; mais il fallait pour cela s'adresser à des pouzzolanes exemptes de chaux susceptible d'être attaquée par les sels magnésiens. Dans ce cas, on pouvait recourir aux pouzzolanes volcaniques et aux pouzzolanes artificielles produites par la cuisson modérée des argiles réfractaires ou des roches primordiales décomposées, telles que granites ou gneiss riches en feldspath, ou enfin aux roches amphiboliques dont nous avons parlé (75).

Dans ces conditions, la résistance chimique des nouveaux silicates à base d'alumine et de chaux ne saurait être douteuse, mais la résistance physique exigeait de son côté un degré de cohésion auquel tous ne peuvent pas arriver indistinctement; ainsi les pouzzolanes volcaniques en général, celles qui résultent de la faible cuisson de certains gneiss décomposés et de quelques argiles ocreuses très-énergiques d'ailleurs par le concours de la chaux grasse, ces pouzzolanes, disait-on, n'ont abouti avec la magnésie qu'à des duretés finales trop faibles pour résister au choc des vagues.

Les expériences entreprises et suivies longtemps par mon fils, ancien élève de l'école Polytechnique, ont surabondamment démontré, au contraire, que les pouzzolanes artificielles produites par la cuisson normale des argiles pures réfractaires, des argiles kaolines et de quelques roches amphiboliques décomposées, ont toujours, avec 15 à 20 p. °/₀ de magnésie, parfaitement réussi et sont arrivées en quatre à cinq mois d'immersion à des ténacités de 5 à 10 kil. par centimètre carré. La prise sous l'eau de quelques-unes de ces gangues s'est même, dans quelques cas, opérée beaucoup plus vite que celle des gangues correspondantes à chaux grasse.

Dans l'ignorance où l'on a été jusqu'à ce jour de la manière dont la mer procède à la destruction des composés hydrauliques à base de chaux, on a pu se demander quelles garanties d'*avenir* offrent les composés à base de magnésie: ces garanties, outre qu'elles résident dans leur composition, qui, considérée

chimiquement, n'offre aucune prise aux sels magnésiens, tient encore à ce fait important, savoir : qu'immergés frais ou durs ils n'altèrent en rien l'eau de mer ou les dissolutions magnésiques (sulfates ou chlorhydrates) dans lesquelles ils sont plongés, tandis que les composés à base de chaux les attaquent ou en sont attaqués *immédiatement;* et s'il arrive que les effets de cette attaque ne se fassent sentir que quelques années après, la ruine qui survient n'en est pas moins la conséquence du travail qui, par suite, s'est opéré sourdement dans le tissu des composés.

Les gangues à base d'alumine et de magnésie, outre que leur durée en mer serait à la fois indépendante des encroûtements sous-marins et des transformations par substitution de principes, auraient sur les gangues résistantes par ces moyens, l'avantage de pouvoir être employées fraiches et immergées à l'état pâteux à des profondeurs quelconques à travers l'eau de mer. Mais leur emploi dans les constructions de ce genre ne sera possible, que lorsque la chimie industrielle aura trouvé un procédé qui permette d'obtenir la magnésie pure à un prix acceptable pour les grands travaux, soit en la séparant des dolomies, soit en l'extrayant des eaux-mères des marais salins.

XIX.

INFLUENCE DE L'EAU DE MER

SUR L'EXTINCTION DE LA CHAUX ET SUR LA QUALITÉ DES MORTIERS ET GANGUES A POUZZOLANES A LA CONFECTION DESQUELS ON L'EMPLOIE.

113. — L'influence dont il s'agit n'avait jusqu'à ce jour reçu encore aucune solution rationnelle ; Bélidor dit qu'avant son époque, « on ne voulait pas se « servir d'eau de mer pour la fabrication des mortiers, parce que l'on croyait « qu'étant salée les mortiers ne durcissaient qu'avec peine ; mais qu'aujour- « d'hui (en 1720) l'on prétendait que c'était une erreur. » Le même auteur

ajoute qu'il n'a par-devers lui aucune expérience qui lui permette de se prononcer (x).

Smeaton, le célèbre constructeur du phare d'Edystone, en face de Plymouth, croit « que si l'eau salée a quelque influence dans la composition des mortiers, « cette influence est plus avantageuse que nuisible (y). »

John, de Berlin, fait observer avec raison que le mortier imprégné de chlorhydrates de soude et de magnésie, reste humide et se couvre d'efflorescences salines qui rendent les habitations malsaines ; il aurait pu ajouter que le mortier des murs de magasins de sel se détériore profondément (z).

M. Néhou, ingénieur des ponts et chaussées, employé jadis aux travaux du port de Calais, dit « qu'il n'a pu reconnaître bien exactement laquelle est « préférable, de l'eau douce ou de l'eau salée, mais que, cependant, la balance « lui a paru pencher en faveur de la dernière (a'). »

M. l'inspecteur général Reibell, directeur des travaux du port de Cherbourg, nous avait, il y a déjà quelque temps, informé qu'il avait reconnu à l'emploi de l'eau de mer une influence retardatrice sur le durcissement des mortiers.

M. l'inspecteur général Noël, directeur des travaux hydrauliques du port de Toulon, nous a communiqué l'observation suivante, savoir : que l'extinction de la chaux avec l'eau salée diminue considérablement son foisonnement et en rend la pâte courte et grumeleuse; il a trouvé que 1,000 kil. de chaux caustique ne donnent, par l'eau salée, que 1,77 en pâte, tandis qu'on obtient 2,38 avec l'eau douce ; le rapport des foisonnements est donc de 1,00 à 0,74. La même eau salée, employée au gâchage des gangues à pouzzolanes, lui a paru offrir des avantages sur l'eau douce.

114. — Nous avons vérifié, sur diverses chaux plus ou moins grasses, cet effet de l'eau de mer sur l'extinction, et, sans tomber précisément sur les

---

(x) Bélidor, *Science des ingénieurs*, chap. III, pag. 18.

(y) *Histoire du phare d'Edystone.* (Extrait de la *Bibliothèque des sciences et arts de Londres*, pag. 89 à 611, tom. I.)

(z) Pièce de concours sur la chaux et les mortiers, par John (1819), couronnée par la Société hollandaise des sciences.

(a') *Annales des ponts et chaussées*, de janvier et février 1835, pag. 109.

mêmes chiffres que M. Noël, ce qui n'était guère possible, nous avons reconnu l'exactitude de ses observations : il est de toute évidence qu'il s'est formé pendant cette extinction une certaine quantité de sulfate de chaux, et qu'il s'en formera davantage encore quand on ajoutera de nouvelle eau salée pour lier la chaux en pâte avec la pouzzolane, matière très-absorbante, et, conséquemment, que dans un mètre cube de ce mélange, tenant 1,000 kil. de pouzzolane et 1/2 mètre cube de chaux en pâte fournie par 282 kil. de chaux caustique, il pourra se trouver, outre une forte dose de sel marin, une quantité assez notable de sulfate de chaux, quantité qu'un calcul fort simple ne permet pas d'évaluer à moins de 5 kilogrammes (*b'*).

Il est donc possible que la présence de ces sels, qui tendent à cristalliser et à pousser, augmente un peu la densité des composés hydrauliques dans lesquels ils sont disséminés, et ajoute ainsi quelque chose à leur cohésion dans les débuts; mais ce qu'il importerait de savoir, c'est la différence qui, dans la suite, pourra exister entre les gangues à eau salée et les gangues correspondantes à eau douce. Nous manquons de données pour répondre à cette question, et nous ne pouvons que montrer, par divers exemples et par analogie seulement, quel serait le danger si la dose de sulfate de chaux formée dans les tissus venait à dépasser certaines limites.

115. — Quelques livraisons de ciment artificiel de Portland, ayant à Cherbourg donné lieu en 1853, après gâchage et immersion, à des fendillements et crevasses, suivis d'une dislocation rapide et complète, on dut en chercher la cause par l'analyse, et l'on trouva dans ce ciment de 6 à 9 pour 100 de sulfate de chaux, provenant, au dire des fournisseurs, d'un changement inattendu dans la composition des matériaux craie et argile employés à sa fabrication. La synthèse confirma l'analyse, en reproduisant exactement, par l'introduction, après coup et en égales quantités, du plâtre cuit dans d'excellents ciments, tous les phénomènes observés; phénomènes que nous avons vus se

(*b'*) 1/2 mètre cube de chaux grasse en pâte absorbe 438 kil. d'eau de mer, tenant $3^{k}066$ de sulfate de magnésie, ou $1^{k}977$ d'acide sulfurique, pouvant engendrer $3^{k}36$ de sulfate de chaux; ajoutant moitié en sus à cause du surcroît d'eau exigé par le gâchage, il vient $5^{k}04$.

renouveler, même en eau douce, sur d'autres ciments contenant naturellement 5 pour 100 d'acide sulfurique, donnant lieu à 8,50 de sulfate de chaux. Mais à dose de 1,70 à 2,240 du même sel, nous n'avons jamais rien remarqué qui ait pu faire soupçonner une influence fâcheuse ; or, dans la gangue à pouzzolane prise ci-devant pour exemple, les 5 kil. de sulfate de chaux, rapportés à une masse de 1,282 kil. censée anhydre, ne représentent que 0,393 pour 100 ; et si nous abordons le cas extrême d'une pénétration après coup de 300 kil. d'eau salée dans une semblable masse immergée après dessication naturelle complète, nous ne trouvons que 2k30 d'augmentation en sulfate de chaux, ce qui, pour toute la masse, donne 7k30 ou 0k59 sur 100 de masse anhydre, et 0k46 toute eau comprise.

A part donc la question d'insalubrité, quand il s'agit des habitations, le seul inconvénient, jusqu'à présent démontré, de l'emploi de l'eau de mer dans la confection des composés hydrauliques, paraît devoir se réduire à l'introduction d'un excès de chaux, par suite de la plus grande quantité contenue sous le volume qui forme la proportion ordinaire. Nous ne pouvons prévoir d'ailleurs l'influence qui peut s'ensuivre, lorsqu'il s'agit de constructions à la mer ; toujours est-il que, lorsqu'on a le choix, c'est l'eau douce qu'il faut préférer, soit pour l'extinction de la chaux, soit pour le gâchage des matières.

TABLE DES MATIÈRES.

Préface de l'Editeur.
Motifs de cette publication.

PREMIÈRE PARTIE.

13

SECONDE PARTIE.

TROISIÈME PARTIE.

QUATRIÈME PARTIE.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

